NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. Edouard-Alfred MARTEL

Membre du Conseil supérieur d'Hygiène publique de France
Collaborateur adjoint des Services de la Carte géologique
Ancien Président de la Commission centrale
de la Société de Géographie de Paris
Lauréat de l'Institut

PARIS
MASSON et Cie, ÉDITEURS
Libraires de l'Académie de Médecine
120, Boulevard Saint-Germain (VIe)

—

1911

NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. Edouard-Alfred **MARTEL**

TITRES ET FONCTIONS

1882. — Licencié en droit.

24 décembre 1886-12 avril 1899. — Avocat agréé au Tribunal de Commerce de la Seine.

1892. — Membre de la Commission centrale de la Société de géographie de Paris.

1895. — Fondateur et secrétaire général de la Société de spéléologie.

1899-1905. — Cours libre de géographie souterraine à la Sorbonne (faculté des sciences de l'Université de Paris).

1901 (26 mai). — Collaborateur des services de la carte géologique de France (*ministère des Travaux Publics*).

1903 (13 juin). — Auditeur au Comité consultatif (Conseil supérieur) d'hygiène publique de France (*ministère de l'Intérieur*).

1904. — Vice-Président de la Commission centrale de la Société de géographie de Paris.

1905. — Directeur de la *Nature* (revue des sciences et de leurs applications).

1905 (23 mars). — Membre du Comité d'études scientifiques de l'Hydraulique agricole au *ministère de l'Agriculture*.

1907. — Président de la Commission centrale de la Société de géographie de Paris.

1907 (22 mars). — Membre de la Commission chargée d'étudier la protection des cours d'eau non navigables et des eaux souterraines (*ministère de l'Agriculture*).

1908 (13 mars). — Membre du Conseil supérieur de surveillance des eaux d'alimentation de l'armée au *ministère de la Guerre*.

1908 (2 décembre). — Membre de la Commission des eaux de Versailles (*sous-secrétariat d'État des Beaux-Arts*.

1909 (5 janvier). — Membre titulaire du Conseil supérieur d'hygiène publique de France.

1909 (21 juin). — Chargé des études souterraines relatives à l'inventaire des ressources hydrauliques de la France, au *ministère de l'Agriculture*.

1909 (24 septembre). — Membre de la Commission supérieure de surveillance des eaux d'alimentation et d'épidémiologie navale au *ministère de la Marine*.

DISTINCTIONS HONORIFIQUES

1890 (25 avril). — Lauréat de la Société de géographie de Paris.

1892 (13 décembre). — Médaille de bronze du ministère de l'Intérieur et de l'Académie de Médecine (service des eaux minérales).

1894 (17 décembre). — Lauréat de l'Académie des Sciences (prix Gay, géographie physique).

1898 (19 juin). — Chevalier de la Légion d'honneur (ministère de l'Instruction publique ; congrès des Sociétés savantes ; recherches topographiques et souterraines de 1883 à 1897).

1898 (20 janvier). — Grande médaille de la Société de topographie de France.

1907 (2 décembre). — Lauréat de l'Académie des Sciences (grand prix des sciences physiques : Les abîmes et les cavernes, étude générale des eaux souterraines, notamment au point de vue de l'hygiène).

1909 (22 juillet). — Officier de la Légion d'honneur (ministère de la Guerre ; services rendus dans l'étude des questions d'hygiène militaire, épidémies de fièvre typhoïde de Cherbourg et Saint-Brieuc. — Etc., etc.

VOYAGES D'ÉTUDES ET MISSIONS SCIENTIFIQUES (1)

1882. — Alpes Autrichiennes et Dolomitiques.

1883 à 1900. — Études géographiques et explorations souterraines dans la région des Causses (Lozère, Gard, Hérault, Aveyron, Lot, Dordogne, etc.)

1887. — Révision sommaire de la carte au 80,000e sur la frontière française des Alpes (mission du ministère de la Guerre).

1888. — Belgique (Han-sur-Lesse), Causses.

1889. — Gouffres de Padirac (Lot), de la Lozère et de l'Aveyron.

1890. — id. et du Lot. — Belgique.

1891. — Katavothres du Péloponèse. — Lot.

1892. — Gouffres de Vaucluse, Ardèche, Charente, Côte-d'Or, etc.

1893. — Grottes, gouffres et sources du Karst autrichien, de Bosnie-Herzégovine et Monténégro (mission du ministère de l'Instruction publique).

1894. — Norvège. — Lot, Tarn-et-Garonne; Dauphiné.

1895. — Grande-Bretagne et Irlande (mission du ministère de l'Instruction publique).

1896. — Catalogne, îles Baléares, Ariège, Vercors et Dévoluy (Dauphiné).

1897. — Jura, Savoie, Suisse, Causses.

1898. — Allemagne, Moravie, Hongrie, Belgique.

1899. — Vaucluse (2e série) (ministère de l'Agriculture).

1900. — Charentes, Dordogne, Savoie, Dauphiné, Suisse, Jura, Pyrénées.

1901. — Jura, Suisse, Espagne, Belgique.

1902. — Jura, Suisse, Champagne, Allemagne, Savoie, Pyrénées, Languedoc.

1903. — Belgique, Hérault, Caucase Occidental (mission du gouvernement russe). Italie et Sicile, etc.

1904. — Angleterre, Dauphiné.

1905. — Grand Cañon du Verdon, abîmes de Canjuers et Fontaine l'Évêque (ministère de l'Agriculture). — Côte-d'Or, Espagne et Portugal, Belgique.

1906. — Fontaine l'Évêque (ministère de l'Agriculture), Clues de Provence. — Espagne, Normandie.

(1) Tous exécutés à mes frais personnels, sauf ceux de 1887, de Vaucluse (1899), du Caucase (1903) et des missions du ministère de l'Agriculture (depuis 1905).

1907. — Pyrénées. — Port-Miou et Alpines. (Ministère de l'Agriculture).

1908. — Corse et Sardaigne. — Pyrénées souterraines (1re série, ministère de l'Agriculture).

1909. — Bretagne et Normandie, captages d'eaux.

Pyrénées souterraines (2e série, ministère de l'Agriculture).

1910. — Turquie et Asie Mineure (Troglodytes de Konié, Sillé, Angora, etc.

Ministère de l'Agriculture { Études des eaux souterraines du Larzac. Expérience de coloration des pertes du Doubs à la source de la Loue, etc.

SOMMAIRE

Né d'une famille de juristes, et voué d'avance à une carrière de Droit, *j'ai dû le goût et la curiosité des phénomènes naturels uniquement à la maîtresse-école des* leçons de choses, *— à quelques voyages d'enfance à Chamonix, en Suisse, aux Pyrénées, en Italie, germes d'une vocation géographique, entravée, mais non étouffée, par l'exercice du Code de Commerce.*

De 1883 à 1885, l'exemple de certaines descentes de gouffres déjà entreprises dans le Karst autrichien (par Lindner, Schmidl, etc. 1840-1853 ; Hanke, Marinitsch, Müller, Putick, etc., depuis 1884), et l'examen détaillé de la région française des Causses, commencé au simple point de vue touristique, me firent prévoir combien de mystères, d'ordre réellement scientifique, restaient à pénétrer dans le sous-sol, alors inaccessible et presque totalement ignoré, de ces grands plateaux calcaires.

En 1888, j'ai entrepris une série d'explorations souterraines méthodiques, que l'emploi (nouveau en pareille matière) du téléphone portatif et des bateaux démontables permit de pousser bien au-delà de tout ce que l'on avait antérieurement tenté dans les cavernes de la France.

Sans interruption depuis ~~cette date j'ai étendu~~ ces recherches spéciales, successivement, des Causses à toutes les régions calcaires de la France et des principaux pays d'Europe, jusqu'au Caucase. En constituant de toutes pièces une véritable géographie souterraine *(1) et en révélant des centaines de curiosités naturelles remarquables, ces investigations souvent périlleuses, toujours difficiles et coûteuses, ont conduit à beaucoup de données scientifiques nouvelles.*

Leurs résultats pratiques surtout ont été utiles à l'hygiène publique ; *ils ont dénoncé des causes insoupçonnées de contamination des eaux, soi-disant potables, et procuré les moyens de protéger, contre ces pollutions et contre les maladies transmissibles qui en résultent, les captages destinés à l'alimentation publique. Enfin ces résultats ont débordé jusque dans le domaine des travaux publics en fournissant de sérieux et indispensables éléments d'enquête aux questions relatives au drainage, à l'irrigation, à l'utilisation des forces naturelles hydrauliques (houille blanche) dans les régions montagneuses. Bref mes travaux peuvent se classer en sept subdivisions :*

(1) Que M. E. Rivière a baptisée du nom de *Spéléologie*.

A. Hydrologie souterraine. — B. Hygiène publique et maladies transmissibles. — C. Géographie physique. Géologie générale. Minéralogie. — D. Physique générale. — E. Économie rurale et travaux publics. — F. Géographie régionale. — G. Divers.

Jusqu'en 1904 inclus, toutes ces recherches et explorations ont été (sauf deux exceptions) exclusivement effectuées sur ma seule initiative et à mes frais personnels.

Voici l'analyse sommaire de leurs conséquences et des publications que j'y ai consacrées.

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

DES

PRINCIPALES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

DE E.-A. MARTEL

I. OUVRAGES EN LIBRAIRIE

I. — *Les Cévennes* (Etude des Causses, 1883-1889), in-8°, 400 pages, 159 gravures et plans. Paris, 1890 (dix éditions).

II. — *Les Abîmes* (Explorations souterraines, 1888-1893), in-4°, 580 pages, 320 gravures et plans. Paris, 1894 (épuisé).

III. — *Irlande et Cavernes anglaises*, in-8°, 400 pages, 142 gravures et plans. Paris, 1897.

IV. — *Le Trayas et l'Estérel*, in-8°, 80 pages. Paris, 1899 (2 éditions).

V. — *La Spéléologie*, in-8°, 125 pages. Paris, 1900 (cours libre de la Sorbonne).

VI. — *Le gouffre et la rivière souterraine de Padirac*, in-12, 180 pages, 50 gravures et plans. Paris, 1901 (2 éditions).

VII. — *La Photographie souterraine*, in-8°, 70 pages, 27 figures. Paris, 1903.

VIII. — *La Spéléologie au XXe siècle*, in-8°, 810 pages, 42 figures et plans. Paris, 1905-1906.

IX. — *L'Evolution souterraine* (bibliothèque de philosophie scientifique), in-16, 388 pages, 80 figures (2 éditions). Paris, 1908.

X. — *La Côte d'Azur Russe*, in-8°, 356 pages, 423 figures et plans. Paris, 1909.

XI. — *Carte de l'Estérel au 20.000*^e, publiée par le Touring-Club. Paris, 1903.

EN COLLABORATION

XII. — A. Lorria et E.-A. Martel. — *Le Massif de la Bernina*, in-folio oblong, 50 héliogravures et 150 gravures. — Zurich, 1895 (épuisé).

XIII. — De Launay, Martel, Ogier, Bonjean. — *Le Sol et l'Eau*, in-8°, 486 pages. — Paris, 1906 (fascicule II du *Traité d'hygiène* de Brouardel et Mosny).

XIV. — Van den Broeck, Martel et Rahir. — *Cavernes et eaux souterraines de la Belgique*, 2 vol. in-8°, 1800 pages, 26 pl. et 425 figures. Bruxelles, 1910.

II. NOTES ET MÉMOIRES PUBLIÉS DANS DES RECUEILS PÉRIODIQUES

1° COMPTES RENDUS DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

1. — *Sur des fragments de crânes humains et un débris de poterie contemporains de l'Ursus spelæus* (9 novembre 1885 ; avec M. L. De Launay).

2. — *Sur les roches de Montpellier-le-Vieux* (*Aveyron*), 26 juillet 1886.

3. — *Sur la traversée de la rivière souterraine de Bramabiau et sur la formation des cañons des Causses* (3 décembre 1888).

4. — *Sur l'exploration et la formation des avens des Causses* (14 octobre 1889 ; avec M. G. Gaupillat).

5. — *Sur la formation des sources dans l'intérieur des plateaux calcaires des Causses* (25 novembre 1889 ; avec M. G. Gaupillat).

6. — *Sur une cause particulière de contamination des eaux de sources dans les terrains calcaires* (21 mars 1892).

7. — *Sur la glacière naturelle du Creux-Percé* (*Côte-d'Or*) (23 mai 1892).

8. — *Sur le gouffre du Creux de Souci* (*Puy-de-Dôme*) (4 juillet 1892 ; avec MM. Delebecque et Gaupillat).

9. — *Sur la rivière souterraine du Tindoul de la Vayssière* (*Aveyron*) (7 novembre 1892 ; avec M. G. Gaupillat).

10. — *Sur la caverne du Boundoulaou* (*Aveyron*) (19 juin 1892 ; avec M. E. Rivière).

11. — *Sur la température des cavernes* (12 mars 1894).

12. — *Sur de nouvelles observations dans le gouffre de Padirac* (21 octobre 1895).

13. — *Sur le gouffre de Gaping Ghyll* (*Angleterre*) (6 janvier 1896)

14. — *Sur quelques anomalies de la température des sources* (13 janvier 1896).

15. — *Sur des observations d'hiver dans les cavernes des Causses* (20 avril 1896).

16. — *Sur les siphons des sources et des rivières souterraines* (18 mai 1896).

17. — *Sur la Foiba de Pisino* (*Istrie*) (28 décembre 1896.)

18. — *Sur les scialets et l'hydrologie souterraine du Vercors* (*Drôme*) (16 novembre 1896 ; avec M. Delebecque).

19. — *Sur l'hydrographie souterraine et les chouruns du Dévoluy* (*Hautes-Alpes*) (24 mai 1897).

20. — *Sur la Cueva del Drach* (*île de Majorque*) (14 juin 1897).

21. — *Sur l'Aven Armand* (*Lozère ; profondeur 207 mètres*) (26 octobre 1897 ; avec M. Viré).

22. — *Sur la contamination de la source de Sauve* (*Gard*) (29 novembre 1897).

23. — *Sur les avens de Sauve* (*Gard*) *et la forme des réservoirs des sources en terrains calcaires* (17 janvier 1898, avec M. Viré).

24. — *Sur l'éboulement de Saint-Pierre-de-Livron et les infiltrations des plateaux de tuf* (9 mai 1898).

25. — *Nouvelles observations dans la grotte et la rivière de Han-sur-Lesse* (*Belgique*) (24 octobre 1898).

26. — *Sur de nouvelles recherches souterraines en Dévoluy* (*Hautes-Alpes*) *et sur le Chourum Martin* (310 et 500 mètres) (11 décembre 1899).

27. — *Sur de nouvelles constatations dans la rivière souterraine de Padirac* (9 juillet 1900).

28. — *Sur de nouvelles constatations relatives à la contamination des résurgences* (*sources vauclusiennes*) *des terrains calcaires en France* (23 décembre 1901).

29. — *Sur l'origine et l'âge de la Fontaine de Vaucluse* (27 janvier 1902).

30. — *Sur la rivière souterraine de Trépail* (*Marne*) (16 juin 1902).

31. — *Sur la caverne du Höll-Loch* (Trou d'Enfer) *et la Schleichende Brunnen* (Source rampante ; Suisse) (4 août 1902).

32. — *Sur le fonctionnement et l'alimentation de la fontaine de Vaucluse* (10 novembre 1902).

33. — *Sur l'origine des lapiaz et leur relation avec les abîmes et l'hydrologie souterraine des calcaires* (15 décembre 1902).

34. — *Sur l'enfouissement des eaux souterraines et la disparition des sources* (2 mars 1903).

35. — *Sur la grotte de Font de Gaume* (*Dordogne*) *et l'âge du creusement des cavernes* (5 juin 1903).

36. — *Sur l'application de la fluorescéine à l'hydrologie souterraine* (20 juillet 1903).

37. — *Sur la géologie et l'hydrologie souterraine du Caucase occidental* (14 décembre 1903, avec M. A. Yermoloff).

38. — *Sur le gouffre tunnel d'Oupliz-Tsihé* (*Transcaucasie*) (22 février 1904).

39. — *Sur la source sulfureuse de Matsesta* (*Transcaucasie*) *et la relation des cavernes avec les sources thermo-minérales* (18 avril 1904).

40. — *Sur l'Oucane de Chabrières* (*Hautes-Alpes*) *et l'origine des lapiaz* (16 août 1904).

41. — *Sur le gouffre du trou de Souci* (*Côte-d'Or*) (31 octobre 1904).

42. — *Sur la résurgence de Wells* (*Angleterre*) *et la chronométrie de l'érosion souterraine* (12 décembre 1904).

43. — *Sur l'application de la thermométrie au captage des eaux d'alimentation* (27 février 1905).

44. — *Sur la formation de la grotte de Rochefort* (*Belgique*) (19 juin 1905).

45. — *Sur une nouvelle exploration du gouffre du Trou de Souci* (*Côte-d'Or*) (17 juillet 1905).

46. — *Sur Fontaine l'Évêque et les Abîmes du Plan de Canjuers* (*Var*) (11 décembre 1905 ; avec M. Le Couppey de la Forest).

47. — *Sur le grand Cañon du Verdon* (*Basses-Alpes*), *son âge et sa formation* (5 mars 1906).

48. — *Sur les Abannets de Nismes* (*Belgique*) (14 mai 1906 ; avec M. E. Van den Broeck).

49. — *Sur la rapidité de l'érosion torrentielle* (18 juin 1906).

50. — *Sur le défaut d'étanchéité des zones imperméables dans les sous-sols calcaires* (1er octobre 1906).

51. — *Sur les Crues de Provence et sur les irrégularités des Courbes d'équilibre des cours d'eau* (4 mars 1907).

52, — *Sur les gouffres de la mer et le volcanisme* (24 juin 1907).

53. — *Sur le gouffre des Corbeaux et la Fontestorbes* (*Ariège*) (16 juillet 1907).

54. — *Sur les eaux souterraines, abîmes et cañons du pays basque* (9 décembre 1907).

55. — *Sur les variations de température de la source de la Sainte-Baume* (*Var*) (6 avril 1908).

56. — *Sur l'origine torrentielle des roches ruiniformes calcaires* (22 juin 1908).

57. — *Sur l'érosion des grès de Fontainebleau* (19 octobre 1908).

58. — *Sur la rivière souterraine de La Grange* (*Ariège*). (9 novembre 1908).

59. — *Sur la prétendue source sous-marine de Port-Miou* (*Bouches-du-Rhône*). (21 décembre 1908).

60. — *Sur le phénomène d'intermittence du gouffre de Poudak* (*Hautes-Pyrénées*). (24 mai 1909).

61. — *Sur les lapiaz des Bracas* (*Basses-Pyrénées*) *et d'El-Torcal* (*Andalousie*). (28 juin 1909).

62. — *Sur la rivière souterraine de Labouiche ou La Grange* (*Ariège*). (26 octobre 1909).

63. — *Sur l'hydrologie souterraine du massif de Pène-Blanque ou Arbas* (*Haute-Garonne*). (13 décembre 1909).

64. — *Sur les conditions de filtrage efficace des eaux souterraines dans certaines formations calcaires* (avec M. E. Van den Broeck). 19 septembre 1910).

65. — *Sur les abîmes des Pyrénées* (31 octobre 1910).

66. — *Sur la désobstruction artificielle des abîmes* (5 décembre 1910).

2° ANNALES DES MINES

67. — *Applications géologiques de la spéléologie* (juillet 1896 ; 100 pages et 3 plans).

3° ANNALES DE L'HYDRAULIQUE AGRICOLE

(Fascicules roses. — Ministère de l'Agriculture.)

68. — *Etude de la source de Fontaine-l'Evêque* (*Var*). (1905, fasc. 33 ; 66 pages, plans et figures).

69. — *Etude complémentaire sur Fontaine-l'Evêque* (1906, fasc. 34).

70. — *Captage et protection hygiénique des eaux d'alimentation* (avec le Dr Henri Thierry ; 1907, fasc. 35 ; 21 pages et 35 figures).

71. — *Rapport sur un projet d'utilisation de la source sous-marine de Port-Miou* (*Bouches-du-Rhône*). (1907, fasc. 36 bis, 6 figures).

72. — *Rapport sur les eaux souterraines des Alpines* (*Bouches-du-Rhône*). (1907, fasc. 36 bis ; 23 pages, 21 figures et plans).

73. — *Rapport sur l'exploration souterraine des Pyrénées, 1re mission.* (1908, fasc. 38, sous presse).

74. — *Rapport sur l'exploration souterraine des Pyrénées, 2e mission.* (1909, fasc. 39, sous presse).

4° BULLETIN DES SERVICES DE LA CARTE GÉOLOGIQUE DE FRANCE

75. — *La Caverne de Trépail* (*Marne*) *et les rivières souterraines de la craie* (Bulletin n° 88, t. XIII, 1902 ; 21 pages, 3 figures et plans).

76. — *L'érosion des grès de Fontainebleau* (Bulletin n° 127, t. XXI, 1910 ; 40 pages et 28 figures).

5° BULLETIN DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE

77. — *Fragments de crânes humains et débris de poterie paléolithique* (avec M. L. De Launay : 7 décembre 1885).

78. — *Formation géologique de Montpellier-le-Vieux* (16 avril 1888).

79. — *Eaux souterraines des Causses* (20 mai 1889).

80. — *Géologie des grottes et des eaux souterraines* (avec M. L. de Launay) (1er décembre 1890).

81. — *Explorations souterraines de 1888 à 1895* (conférence du 24 février 1876; Compte rendu n° 2, p. XXXV).

6° CONGRÈS GÉOLOGIQUE DE 1900

82. — *Les cavernes de la région des Causses* (Livret-guide officiel, n° XXII, 30 p.).

83. — *L'excursion des Causses* (compte rendu).

84. — *Les récentes explorations souterraines et les progrès de la spéléologie* (compte rendu, 15 p., conférence).

7° BULLETIN DE LA SOCIÉTÉ BELGE DE GÉOLOGIE, HYDROLOGIE ET PALÉONTOLOGIE

85. — *Nouvelles constatations à Han-sur-Lesse* (avec M. Van den Broeck) (Tome XII, 1898, publié en avril 1902, 20 p.).

86. — *Les récentes explorations souterraines* (t. XVI, mars 1902).

87. — *Protection des grandes sources des terrains calcaires de France* (t. XVI, juillet 1902).

88 et **89.** — *Notes sur l'emploi de la fluorescéine en hydrologie* (t. XVII, septembre 1903).

90. — *Expériences complémentaires* (*au Caucase*) *sur la fluorescéine* (t. XVII, 20 octobre 1903).

91. — *Etude des eaux courantes par la fluorescéine* (en collaboration) (fascicule spécial, 1903).

8° ASSOCIATION FRANÇAISE POUR L'AVANCEMENT DES SCIENCES

92. — Paris, 1890. *Les Causses du Languedoc* (conférence).

93. — Besançon, 1893. *La Spéléologie.*

94. — Carthage, 1896. *Retard de la cartographie officielle en France. Le reboisement des plateaux calcaires.*

95. — Paris, 1898. *L'exploration scientifique des cavernes* (*de 1890 à 1897;* conférences de Paris).

96. — Paris, 1900. *Les récentes explorations souterraines* (1886-1900).

97. — Montauban, 1902. *Eaux souterraines du Tarn-et-Garonne.*

98. — Montauban, 1902. *Phénomènes caverneux du calcaire.*

99. — Montauban, 1902. *Inaptitude des stalagmites* à servir d'élément chronologique pour la préhistoire dans les cavernes.

100. — Grenoble, 1904. *Creusement des vallées* (Bulletin mensuel de novembre, page 251).

101. — Cherbourg, 1905. *Le Creux de Souci (Côte-d'Or).*

102. — Cherbourg, 1905. *A propos de la loi sur la santé publique.*

103. — Lyon, 1906. *Creusement des vallées et érosion glaciaire.*

9° ABIMES ET GROTTES DU DAUPHINÉ

104. — *Les abîmes du Dauphiné* (annuaire des touristes du Dauphiné pour 1896, 60 p. et figures).

105. — *Les cavernes de la Grande Chartreuse et du Vercors* (idem pour 1899, 87 p. et figures).

106. — *Les Chouruns du Dévoluy (Hautes-Alpes)* (Bulletin de la Société d'études des Hautes-Alpes, 1902, 49 p. et figures).

107. — *L'Oucane de Chabrières (Hautes-Alpes)* (*La Montagne*, revue du club alpin, 20 décembre 1906, 23 p., plans et figures).

10° SOCIÉTÉ DE GÉOGRAPHIE DE PARIS

108. — *Abîmes du Causse de Gramat et Katavothres du Péloponèse* (1891), (compte rendu sommaire de la séance du 18 décembre 1891).

109. — *Cinquième campagne souterraine* (1892 ; Vaucluse, Ardèche, Causses, Charente, Puy-de-Dôme, Côte-d'Or) (comptes rendus des séances 22 avril, 1er juillet et 2 décembre 1892).

110. — *La Rivière souterraine de Bramabiau (1888-1892)* (Bin trimestriel, 1er trim. 1893, 27 p. et plan au 1.250e).

111. — *Onzième campagne souterraine* (Belgique, Moravie, Hongrie, Allemagne) (C. R. d'avril 1899).

112. — *Douzième campagne souterraine (1899)* (la Géographie, 15 janvier 1900).

113. — *Padirac (étude d'hydrologie souterraine)*, (15 mai 1900); 20 p., fig. et plan en couleur au 1/4.000e).

114. — *Pont naturel de Baousse del Biel (Lozère)* (15 juillet 1900).

115. — *Treizième campagne (1900)* (15 juillet 1901).

116. — *Le Caucase* (15 novembre 1901).

117. — *Quatorzième et quinzième campagnes (1901-2)* (21 p., 15 mai 1903).

118. — *Géographie préhistorique de la France* (26 p., 15 août 1909).

119. — *La théorie de la grundwasser et les eaux souterraines du Karst* (15 février 1910).

120. — *Hydrologie souterraine des Pyrénées* (15 octobre 1910).

11° SPELUNCA (BULLETIN ET MÉMOIRES DE LA SOCIÉTÉ DE SPÉLÉOLOGIE)

121. — N° 1. *Troisième exploration du gouffre de Padirac* (avec M. E. Rupin; janvier 1896, 24 p. et fig.).

122. — N° 11. *Bibliographie spéléologique* 1895-1897 (décembre 1897; 70 p.).

123. — N° 19. *Grottes de la Balme (Isère), de Savoie et de Suisse* (avril 1899; 40 p. et fig.; 10° camp. souter.).

124. — N° 20. *Aven Armand et gouffres de Sauve (Gard)* (juin 1899; 34 p. et fig.; 10° camp. souter., fin).

125. — N° 32. *Les cavernes de Majorque* (février 1903; 32 pages, 23 figures et plan de la Cueva del Drach au 2.000°).

126. — N° 37. *Notes spéléologiques* (juin 1904; 35 p.).

N°s 41 à 46. (V. ouvrages, n° VIII).

127. — N° 54, *Cavernes de Tarascon sur l'Ariège* (décembre 1908; 47 p., 28 fig.).

128. — N° 57. *Notices spéléologiques* (octobre 1909; 15 p.).

129. — N° 59. *L'hydrologie souterraine aux Etats-Unis* (mars 1910; 35 p.).

130. — *Expériences à la fluorescéine sous les glaciers* (Bulletin n° 16, 4° trimestre 1898).

131. — *Les dernières explorations de Padirac* 1896-1900 (Bulletins n°s 23 et 24, 2° semestre 1900).

12° ANNUAIRE DU CLUB ALPIN FRANÇAIS

132. — Année 1882. — *Alpes autrichiennes*, 29 p.

133. — 1883. — *Le Cañon du Tarn*, 22 p.

134. — 1884. — *Le Causse Noir et Montpellier-le-Vieux*, 31 p.

135. — 1885. — *Auvergne et Cévennes*, 27 p. et plan de Montpellier-le-Vieux, au 20.000°

136. — 1885. — *Karl von Sonklar* (B[in] meusuel de mai 1885).

137. — 1887. — *Les aiguilles du Goûter et d'Argentière*, 49 p, et fig.

138. — Année 1888. — *Sous terre* (1[e] campagne, Dargilan, Bramabiau, etc., 59 p.

139. — 1889. — — (2[e] campagne, Padirac, 45 p.).

140. — 1890. — — (3[e] campagne, Padirac, Lot, 49 p.).

141. — 1891. — — (4[e] campagne, Causse de Gramat, etc., 39 p.).

142. — 1892. — — (5[e] campagne, 1892, Vaucluse, Ardèche, etc., 39 p.).

143. — 1893. — — (6[e] campagne, Karst autrichien, 23 p.).

144. — 1894. — — (7[e] campagne, Lot et Jura, Oisans, 24 p.).

145. — 1895. — — (8[e] campagne, Grande Bretagne, 39 p.).

146. — 1896. — — (9[e] campagne, îles Baléares, Catalogne, Vercors et Dévoluy, 46 p.).

147. — 1897. — *Le Trayas (Estérel, Var)*, 28 p. et plan au 20.000[e].

148. — 1891 — *En Ballon libre.* } Sous la signature de G. Gaupillat.

149. — 1893. — *Ponts Naturels des Alpes-Maritimes, etc.* }

150. — 1904. — *Spéléologie* (Manuel d'alpinisme, p. 196-210).

BULLETIN DE LA SECTION LOZÈRE ET CAUSSES DU CLUB ALPIN

151. — 1885. — *L'Aubrac, Montpellier-le-Vieux*, (n° 1, 35 p.).

152. — 1887. — *Le Cantal* (n° 3).

13° TOUR DU MONDE

153. — *Le Causse Noir et Montpellier-le-Vieux* (livr. 1349 ; novembre 1886).

154. — *Le gouffre du Puits de Padirac* (livr. 1564 ; décembre 1890).

155. — *Dans les cavernes des Causses* (25 juin 1898).

156. — *Aquileja (Autriche)* (8 décembre 1900).

157. — *L'exploration des cavernes* (suppléments des 23 juillet 1898, 15 avril, 29 avril, 20 mai et 3 juin 1899).

158. — *L'exploration du grand Cañon du Verdon* (avec M. Armand-Janet ; 8 et 15 décembre 1906).

14° REVUE DE GÉOGRAPHIE DE DRAPEYRON

159. — *Sous terre (2[e] campagne)* (1889)

160. — *Les Katavothres du Péloponèse* (1892).

161. — *Le Tindoul de la Vayssière (Aveyron)* (avec G. Gaupillat ; 1892).

162. — *La caverne de Saint-Marcel-d'Ardèche* (1892).

163. — *La rivière souterraine de Padirac* (1896).

15° CONGRÈS DU SUD-OUEST NAVIGABLE

164. — *L'enfouissement des eaux souterraines ; le reboisement obligatoire ; les Pyrénées souterraines* (1903).

165. — *Les tunnels de Minerve (Hérault) et la déchéance hydrologique des calcaires* (1904).

166. — *La vitesse de l'Erosion torrentielle* (1907).

16° BULLETIN DE LA SOCIÉTÉ SCIENTIFIQUE DE LA CORRÈZE (BRIVE)

167. — *Sous terre* (*Causses et Padirac ; 2e campagne*), t. XI, 1889, 45 p.

168. — — — 3e — t. XIII, 1891, 75 p.

169. — — — 4e — t. XIV, 1892, 48 p.

170. — — — *5e et 6e camp.*), t. XV, 1893, 42 p.

171. — *Le gouffre de Lantouy*, XVII, 1895.

172. — *Le Refuge de Roc de Gorp ou d'Aucor*, XVII, 1895.

173. — *Un Naufrage à 100 mètres sous terre* (avec M. Rupin, Padirac, 1895), t. XVII, 1895, 34 p.

174. — *4e et 5e explorations de Padirac*, t. XVIII, 1896, 30 p.

175. — *Les Cavernes des grès triasiques de Brive*, t. XXIX, 1907, 15 p.

17° PÉRIODIQUES DIVERS

176. — *Conférence sur la région des Causses* (28 avril 1886), Bin de la Société de topographie de France, 2e trim. 1886.

177. — *Les Causses du Languedoc* (conférences de l'exposition de 1889, 5 sept.), 49 p.

178. — *Le sous-sol des Causses* (Bin de la Société normande de géographie, Rouen, 1893 ; 40 p. et fig. ; conf.).

179. — *La Spéléologie*, conférence du 7 avril 1898, à la *Société de secours des amis des Sciences.*

180. — *Levés topographiques sommaires dans les explorations de cavernes* (Bulletin de la Société de Topographie de France, 2e trim., 1892).

181. — *Du mode de remplissage des cavernes*, comptes rendus du congrès des Sociétés savantes de 1900.

182. — *L'enfouissement des eaux souterraines et le dessèchement de la terre* (*La Science au XX*e *siècle*, 15 juin et 15 juillet 1903).

183. — *La marche à la Lune* (1er congrès de l'*Arbre et l'Eau*, Limoges, juin 1909).

184. — *Conditions hygiéniques des eaux issues des terrains calcaires* (Congrès d'hygiène et de démographie de Bruxelles, sept. 1903, 12 p.).

185. — *Les problèmes de l'eau potable* (Presse médicale du 6 avril 1907).

186. — *Le profil en long du Grand Cañon du Verdon* (Annales de Géographie, 15 novembre 1908).

187. — *La Photographie souterraine* (Bulletin du Photo-Club de Paris, avril 1901 ; 4 fig.).

188. — *Application de la photographie au magnésium à l'archéologie* (congrès international des sciences historiques à Rome, 1903, vol. V.).

189. — *La photographie souterraine au magnésium* (Annuaire général de photographie 1905, p. 410-424, 15 fig.).

190. — *L'homme et la poterie paléolithiques dans la Lozère* (avec M. L. De Launay) (Bin de la Société d'Anthropologie, 14 novembre 1885).

191, 192, 193. — *Réflexions sur Altamira.* — *Oxydation des squelettes préhistoriques.* — *Dolmens taillés du Caucase occidental* (1er congrès préhistorique de France, Périgueux, 1905, 37 p.).

194. — *La grotte d'Altamira et l'âge de ses peintures* (Bin Soc. préhistorique de France), 22 février 1906.

18° PÉRIODIQUES ÉTRANGERS

195. — *Die Tarn Schlucht and Alt-Montpellier.*
196. — *Ersteigung der Mont Blanc und die Aiguille der Goûter.*
197. — *Der glacier d'Argentière.*
(Oesterreichische Alpen-Zeitung (Vienne) 1888.)

198. — *Der Glacier und die aiguille d'Argentière* (1888).
199. — *Das Gebiet der Causses* (1888).
(Mittheilungen du Club-alpin allemand-autrichien 1888.)

200. — *Carte du cours souterrain de la Piuka à Adelsberg* (Petermann's Mittheilungen, 1894).

201. — *Los Congostos del Tarn*, 1886, n° 96.
202. — *Lo rio subterrani de Bramabiau*, 1890, n° 136-138.
203. — *Duas ascensiones al Macis del Mont-Blanc*, 1888, n° 118-120.
(Bulletin de l'Associacio d'Excursions Catalana, Barcelone.)

204. — *The Land of the Causses* (*Appalachia*, Boston, U. S. A., vol. VII, 1893, 33 p.)

205. — *Speleology*, 6e Congrès géographique international à Londres, août 1895.

206. — *Mitchelstown Cave* (*Irlande*) (*Irish naturalist*, avril 1896).

207. — *The Descent of Gaping-Ghyll* (*Yorkshire*) (*Alpine Journal*, mai 1896.)

208. — *Bristish Caves and Speleology* (Geographical Journal, novembre 1897).

209. — *Speleology, modern sporting science* (conférence du 22 nov. 1905, in Yorkshire Rambler's Club, publiée en 1908).

210. — *Scientific exploration of Caves* (8e congrès géographique international à St-Louis, U. S. A.)

III. TRAVAUX TOPOGRAPHIQUES

211. — *Plan de Montpellier-le-Vieux* (*Aveyron*) *au 20.000e*; 1885, no 135; (reporté en correction sur la feuille de Séverac, au 80.000e).

212. — *Plan de la rivière souterraine de Bramabiau au 1250e*, avec M. Mazauric (1893, no 110).

213. — *Carte du Trayas* (*Var*) *au 20.000e*, en courbes de niveau de 20 mètres (1898, no 147).

214. — *Plan du gouffre et de la rivière souterraine de Padirac au 4.000e* (1900, no 113).

(XI) *Carte de l'Estérel au 20.000e*, en courbes de niveau de 50 mètres (avec M. Boissaye, 1902).

215. — *Plan de la grotte de Bétharram* (*Basses-Pyrénées*) *au 4.000e* (1908, no 73).

216. — *Plans des cañons de Cacouette et d'Holçarté Olhadibie* (*Basses-Pyrénées*) (1908 et 1909, no 74).

Plus de 400 plans et coupes (levés sommaires) de cavernes, abîmes et rivières souterraines de France et d'Europe.

IV. LA NATURE (REVUE DES SCIENCES)

217 à 387. — Du 29 août 1885 à fin 1910, 170 notes et articles (pseudonymes : Dr Ouadé et A. Steryal) notamment : Torghatten (Norvège) no 1176 (1895). — Rochers de Weckelsdorf et Adersbach (Bohême) 1373 et 1375 (1899). — Gorge du Régalon (Vaucluse) 1409 (1900). — Baousse del Biel (Lozère) 1450 (1901). — Montagne de sel de Cardona (Catalogne) 1512 (1902). — Rochers de la Tour (Ardennes) 1523 (1902). — Gorges de la Nesque (Vaucluse) 1541 (1902). — Minerve (Hérault) 1556 (1903). — La glacière de la Grâce-Dieu (Doubs) 1615 (1904). — La morve et les

abîmes, 1795 (1907). — Pyramides de Vallauria (Hautes-Alpes) 1807 (1908). — Les abîmes sans fond, 1816. — Gouffre de Proumeyssac (Dordogne), 1830. — La dénudation des roches dures, 1842. — La clue de Daluis (Alpes-Maritimes), 1853. — Débit et fonctionnement de la fontaine de Vaucluse, 1867 (1909). — Formation de la perte et du cañon du Rhône, 1878 — Le problème souterrain du Timavo-Recca, 1897. — Le problème des pertes du Danube, n° 1909. — Etude, captage et protection des eaux potables, n° 1946 (1910). — La catacombe de Champlieu, (Oise), 1951, etc., etc.

Collaboration à la *Grande Encyclopédie, au Dictionnaire Joanne de la France, au Dictionnaire des Dictionnaires, etc.*

Articles divers dans la *Revue scientifique*, le *Monde moderne*, *Tour de France*, *Revue du Touring-Club*, *Sport Nautique*, *Revue des Pyrénées*, *Revue du Vivarais*, *Bulletin du Club Cévenol*, *Société des études du Lot*, etc., etc.

Communications aux congrès des Sociétés savantes, de 1886 à 1908.

Plus de 200 conférences publiques en France et à l'étranger.

ANALYSE DES RECHERCHES ET TRAVAUX

RÉSUMÉ DE LEURS RÉSULTATS

A. — Hydrologie souterraine.

En 1887, Daubrée déclarait que « quand on examine attentivement les dispositions, indéfiniment variées, par lesquelles les lithoclases déterminent « et dirigent la circulation des eaux souterraines, on est obligé de recon- « naître qu'une classification rationnelle de ces mécanismes est très difficile, « sinon impossible, surtout si l'on tient compte de l'impuissance où se « trouve l'observateur de suivre ces dispositions jusqu'à une grande pro- « fondeur »... On ne saisit pas, en général, « dans tous leurs détails, la « disposition des fissures et autres canaux des parcours qui restent cachés ». (*Eaux souterraines*, 1, pp. 129 et 1.)

C'est à ce problème, si nettement posé, de la circulation des eaux souterraines que je me suis attaqué en 1888 : ces quelques lignes définissent à merveille ma tâche d'investigation interne ; le bienveillant appui et les précieux conseils de Daubrée lui-même, A. Cornu, Milne-Edwards, Munier-Chalmas, de Lapparent, A. Gaudry (pour ne citer que les regrettés disparus), et aussi les hauts encouragements de l'Académie des Sciences (prix Gay en 1894 et grand prix des Sciences physiques en 1907) m'ont fait persévérer, sans interruption, dans la voie de ces fécondes recherches : j'y ai trouvé l'emploi annuel de plusieurs semaines ou mois de travaux matériels (1), et la matière des publications dont la liste précède.

Il serait trop long de rappeler les noms et la nature des principales trouvailles effectuées ainsi, parmi plus d'un millier d'abîmes, grottes, rivières souterraines et sources explorés à travers toute la France et toute l'Europe (jusqu'en Transcaucasie) : les titres de mes notes à l'Académie (**1** à **66**) (2) énumèrent les plus importantes.

Je me bornerai à résumer les conclusions ou faits nouveaux qu'elles ont fait connaître.

(1) Avec le concours de nombreux et dévoués collaborateurs, parmi lesquels je dois citer au moins MM. G. et M. Gaupillat, L. De Launay, E. Fournier, Armand Janet, E. Rupin, Ph. Lalande, E. Van den Broeck, L. Rudaux, Bourgeade, Maugard, F. Mazauric, David Martin, N. A. Sidéridès, A. Viré, M. Le Couppey de la Forest, Dr E. Maréchal, O. Décombaz, P. Arnal, etc.

(2) Les chiffres entre parenthèses renvoient aux numéros de ma bibliographie.

Importance de la fissuration du sol. — En ce qui touche l'origine première des cavernes, Buckland (1823), Schmerling (1833), Virlet d'Aoust (1835), Desnoyers (1842), Fournet (1858), etc., avaient parfaitement prévu ou énoncé que les fissures du sol, grandes et petites, ont été les directrices générales des cavités de toutes sortes, et Daubrée a formulé cette loi géologique que le « premier rôle revient aux cassures souterraines ». (*Eaux souterraines*, I, p. 249.)

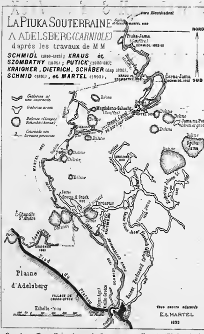


Fig. 1. — Type d'un *réseau* de fissures agrandies et utilisées par les eaux souterraines anciennes et actuelles.

Circulation des eaux souterraines. — Sans aucune exception, toutes mes recherches ont expérimentalement confirmé ce principe fondamental, elles ont nettement expliqué surtout comment la circulation des eaux souterraines, dans les terrains fissurés, s'effectue exclusivement aux dépens des crevasses préexistantes du sol et comment elle a exercé son action sur elles. Des combinaisons extrêmement variées, la plupart du temps aisément discernables sous la terre, résultent des croisements infiniment capricieux entre les diaclases verticales (ou obliques), qui font les galeries hautes, et les joints (horizontaux ou inclinés), qui créent les passages bas et les descentes. Les grandes voûtes ou salles sont aux intersections des *jeux* de fissures ; j'ai expliqué, particulièrement dans *Padirac* (VI, **80**, **113**), comment

se réalisent ainsi les formes les plus diverses de cavernes, abîmes et rivières souterraines.

Le travail des eaux souterraines a établi, par agrandissement des cassures préexistantes, des *réseaux* d'espaces vides souvent *anastomosés* en vrais labyrinthes ; bien que la proportion actuellement découverte de ces réseaux soit encore faible par rapport à leur réelle étendue, j'ai pu démontrer qu'ils se composent essentiellement des trois éléments suivants : 1° les abîmes, pertes, points d'absorption (*morts* ou *vivants*, hors de service ou fonctionnant encore), où les eaux superficielles s'engouffraient jadis ou continuent à s'infiltrer (**13, 44, 46, 79, 80**) ; 2° les cavernes, poches, galeries de toutes formes, où leur circulation et leur emmagasinement furent bien plus abondants dans le passé que dans le présent ; 3° enfin les points d'*émergence* (sources, fontaines, résurgences), qui les rendent au jour plus ou moins intégralement, et après un trajet interne tantôt bref, tantôt très long.

COUPE VERTICALE ET LONGITUDINALE DE POLLAWADDY A MARBLE-ARCH.

Fig. 2. — Coupe verticale (à Marble-Arch, Irlande) d'un type de circulation souterraine en terrain calcaire : Perte de rivière, — abîmes affluents et regards d'effondrement B ; — grottes, siphons et rivière d'emmagasinement, — résurgence de sortie des eaux A.

La *pénétration* des eaux d'infiltration dans les sols perméables *fissurés* s'opère de deux manières : par *suintement* goutte à goutte dans les fentes menues, même imperceptibles, — par *absorption* volumineuse (fig. 2, 3, 4) en filets ou courants dans les *entonnoirs* (pertes, bétoires, etc.), pénétrables ou non, les *cavernes* à pente douce ou rapide, que l'on peut suivre plus ou moins loin, et les *abîmes* ou *puits naturels verticaux*.

(La confusion des nomenclatures des différents pays est absolument inextricable en ce qui touche les points d'absorption, cependant aisés à classer dans l'une des catégories ci-dessus.)

A l'intérieur des sols fissurés, les eaux se réunissent de proche en proche, pour s'écouler en *collecteurs*, en vraies *rivières* (fig. 6) absolument analogues

à celles de l'hydrographie extérieure), par les réseaux de canaux convergeant des petits aux grands, avec tous les accidents connus des confluents, cascades rapides, deltas (fig. 5) (**9**, **16**), îlots, et même petits lacs, le tout sous les voûtes de cavernes, tantôt basses jusqu'à être immergées dans l'eau, tantôt élevées jusqu'à 90 mètres au-dessus du courant souterrain. Elles se gonflent par l'apport constant du suintement des voûtes sous lesquelles elles s'allongent.

Les abîmes. — Quant aux *puits* naturels ou *abîmes* (avens), ils sont, en principe, les affluents de ces rivières souterraines, vers lesquelles ils conduisent les eaux des pluies et des orages, mais c'est par des voies plus ou moins détournées et, la plupart du temps, obstruées pour l'homme, à une

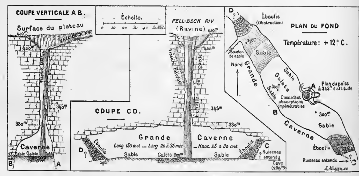


Fig. 3. — Absorption d'un ruisseau par un abîme tombant directement dans une caverne-réservoir. Gaping-Ghyll (Angleterre).

profondeur variable à cause des éboulements ou des accumulations de matériaux détritiques qui, depuis des âges fort reculés, sont tombés au fond et ont fait tampon dans les étranglements des fissures.

Avant les explorations méthodiques d'abîmes (1884 en Autriche, 1888 en France), on estimait que les gouffres aboutissaient directement à de vastes réservoirs intérieurs de sources au sein des massifs fissurés, particulièrement des calcaires. J'ai établi qu'au contraire un très petit nombre (à peine 10 °/₀) conduisent effectivement et utilement aux veines d'eau distinctes qui circulent dans les fissures ; et que l'intérieur des calcaires est en fait bien moins creux qu'on ne l'imaginait jadis.

Ce n'est qu'*accidentellement et quand le sol interposé est peu épais 100 mètres au plus*), *que les avens communiquent directement avec les rivières souterraines* (**4**) (fig. 7 et 8).

Fausse théorie du jalonnement. — Il en résulte que la fameuse théorie du *jalonnement*, de l'abbé Paramelle, voyant « sous chaque rangée



Fig. 4. — Intérieur d'un abîme absorbant et réservoir (Gaping-Ghyll, Angleterre, 1895).

« de bétoires un cours d'eau permanent ou temporaire, qui les a *nécessaire-* « *ment* produites », est inexacte. L'expérience l'a formellement prouvé.

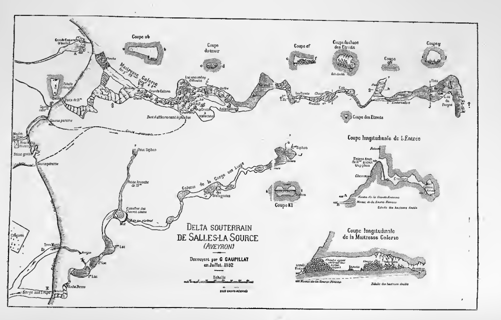


FIG. 5. — Type d'une issue de rivière souterraine disposée en delta (1892-3)

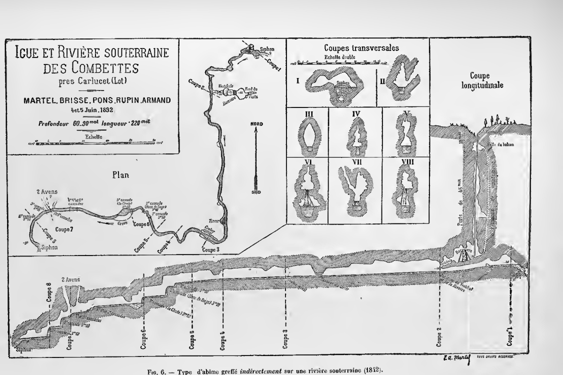


FIG. 6. — Type d'abîme greffé *indirectement* sur une rivière souterraine (1842).

Assez rares en effet sont les abîmes ouverts dans l'axe même du cours d'eau souterrain ; beaucoup, au contraire, de ceux qui ont mené à de tels

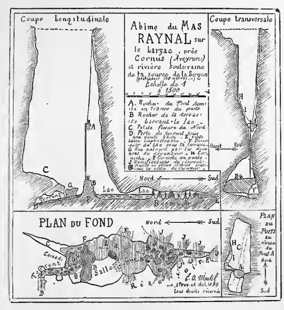


Fig. 7. — Type d'abîme ouvert *directement* en dessus d'une rivière souterraine.

courants y aboutissent latéralement, à angles plus ou moins aigus, par des diaclases *greffées* (fig. 6 et 9) sur l'aqueduc naturel intérieur et indépendant de celui ci. Et si, en dernière analyse, c'est toujours vers ces aqueducs de drainage que les abîmes conduisent les eaux infiltrées, pour la plupart à travers des bouchons de débris divers ou d'argile, la communication n'a réellement lieu que par des *tuyautages* étroits, profonds, contournés et divergeant loin de l'orifice même du gouffre ; caractères restés exclusifs du véritable *jalonnement* (fig. 10, 18, 19).

Comme corollaire de ce qui précède, il a fallu reconnaître aussi que les dépressions des plateaux calcaires, classifiées, par les Autrichiens, sous le

nom de *dolines* du Karst (*cloups* du Quercy, *sotchs* des Causses, *mardelles* de Normandie, etc.), sans qu'on ait pu s'entendre encore sur la définition exacte de ce terme, sont fort loin d'être toujours des *témoins* de cavernes sous-jacentes, obstruées par l'effondrement de leurs voûtes; beaucoup représentent de simples *points d'absorption*, voire d'ex-lacs ou étangs à écoulement souterrain comblé, colmatés par les apports extérieurs (**191**).

Désobstruction des abîmes. — Cependant nombre d'observations permettent de dire que, dans bien des cas particuliers, on pourrait tenter des travaux de désobstruction d'abîmes, après de minutieuses études préparatoires (**66**) (fig. 10).

Émergences des eaux souterraines. — A l'extérieur des sols fissurés, les eaux souterraines effectuent leur sortie en des *points d'émergence* toujours situés, bien entendu, à un niveau inférieur à celui des *points d'absorption*.

Ces points d'émergence sont tantôt impénétrables à l'homme, tantôt, au contraire, ouverts en vastes cavernes, où l'on a pu plus ou moins loin (quelques mètres à plusieurs kilomètres) remonter le fil de l'eau à l'intérieur du sol.

Le *régime variable* de la plupart des grandes émergences des terrains calcaires (v. ci-après) a été expliqué par ce que j'ai trouvé sur le cours des rivières souterraines dont elles constituent l'issue. — En effet, ressemblant d'une manière générale au cours des rivières aériennes, celui des ruisseaux souterrains en

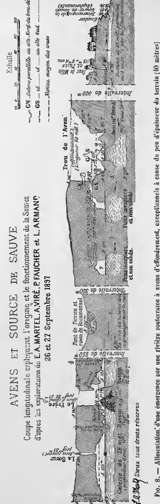


Fig. 8. — Alimentation d'une émergence par une rivière souterraine à avens d'effondrement, exceptionnels à cause du peu d'épaisseur du terrain (40 mètres)

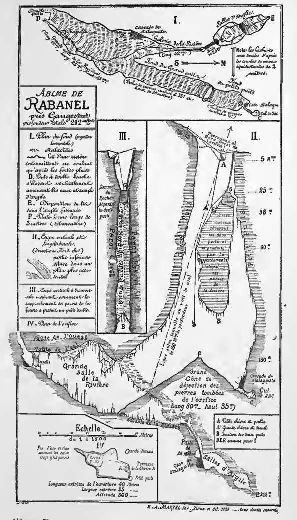


FIG. 9. — Abime greffé sur une caverne, où un ruisseau coule après les pluies et sort d'une source très voisine.

diffère cependant par la nature des trois obstacles spéciaux qui les sèment :

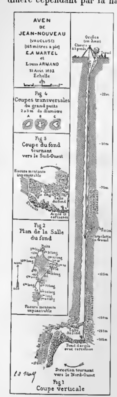


Fig. 10 — Abîme à désobstruer (pour accéder aux réservoirs de Vaucluse).

1° les rétrécissements de galeries parfois réduites à quelques centimètres de largeur; 2° les éboulements intérieurs formant complets barrages, que les eaux doivent traverser ou contourner ; 3° et surtout les abaissements de plafonds, où la roche encaissante est de toutes parts immergée (parfois jusqu'à 50 mètres de profondeur) (fig. 11) en *voûtes mouillantes* ou *siphons d'aqueducs* (vases communicants) (**16**).

Siphons et pression hydrostatique. — C'est en amont de ces siphons que les rivières souterraines, après les pluies, peuvent se mettre en *pression hydrostatique*, sur des hauteurs parfois considérables (j'ai constaté 70 mètres ou plus de sept atmosphères, à la Foiba de Pisino, Istrie, le 15 octobre 1896) (fig. 12) (**10, 17, 67, 171**); et même plus de 100 mètres dans certains abîmes du Karst (celui de Trebić sur la Recca, par exemple) ; ainsi s'expliquent, en partie, les oscillations de niveau des émergences telles que Vaucluse, la Touvre, la Brème (Doubs), etc., et aussi les sources jaillissantes comme l'Oule du Lot (v. fig. 13 et 14) et certains puits du Jura. Ces sources dites *vauclusiennes* devraient être nommées, selon moi, sources *siphonnantes* (*abîmes verticaux émissifs* de Fournet).

Ces siphons ont souvent une origine tectonique, quand ils sont dus à des plissements locaux de couches ou à de longues inflexions de strates en *fond de bateau* ; dans ces cas, l'eau, suivant le pendage général, remonte forcément par un vase communicant (cas de Vaucluse, etc.), si les strates qui l'enferment sont, comme pour les nappes artésiennes, tout à fait imperméables ou compactes, au point de ne lui offrir aucune fissure d'échappement vers des points plus bas. Il en résulte que, *les sources du calcaire peuvent ramener les eaux d'un niveau inférieur à celui même où elles sourdent*. Enfin, c'est de cette manière générale, par le jeu du tube en U, que naissent, souvent à de grandes profondeurs, des sources sous-

fluviales, sous-lacustres et sous-marines, qui sont fréquemment de puissantes rivières.

Comme preuve de ce mécanisme, j'ai rencontré sous terre des *siphons*



Fig. 11. — Exemple de siphons désamorcés en temps de sécheresse (sources de l'Écluse, Ardèche, 1892).

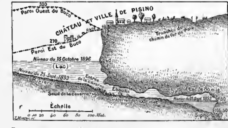


Fig 12. — Preuve de l'établissement de la pression hydrostatique souterraine, par un siphon, après les pluies. Différence entre les eaux basses et hautes (Foiba de Pisino, Istrie, 1893-1896).

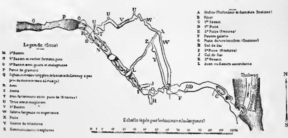


Fig. 13 — Plan d'une source jaillissante (L'Oule, Lot).

désamorcés (fig. 11 et 15), en des moments de sécheresse, où leurs voûtes n'étaient plus immergées par suite de la baisse des eaux (**23**, **25**, **41**, **45**, **58**, **85**, **97**, **101**, **105**, **142**, **145**, **162**, etc.); d'autres ont pu être tournés, généralement par des *trop-pleins* latéraux (**143**), parfois à l'aide de travaux

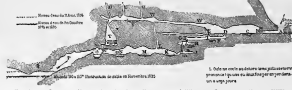


Fig. 14. — Coupe expliquant le mécanisme d'une source jaillissante. Les avens affluents UUU ajoutent leur charge à celle du vase communicant. (V. plan fig. 13.

artificiels (M. Janet a même eu l'audace de plonger sous un tel obstacle et d'émerger, de l'autre côté, à l'embut de Saint-Lambert, Alpes-Maritimes, 1895).



Fig. 15. — Siphon désamorcé ; La Bouiche, Ariège (1909).

Ces siphons, véritables vannes fixes, de section restreinte, régularisent donc, dans une certaine mesure, le débit des eaux souterraines, qu'ils retiennent pour partie dans les réservoirs ou espaces libres situés en amont.

Ce rôle de régulateur serait rendu plus efficace si, connaissant les dimensions et dispositions exactes de ces siphons, l'on pouvait, par des travaux artificiels de *serrement*, les transformer en vannes mobiles, et les asservir ainsi complètement aux besoins de l'industrie, de l'alimentation, de l'irrigation, du drainage, etc.

On connaît aussi certains exemples de rivières souterraines où l'eau absorbée peut être suivie d'un bout à l'autre, sans solution de continuité, sans siphons interrupteurs : par exemple le si curieux réseau de Bramabiau (Gard) (**3** et **110**) (fig. 16). Mais ce sont là des faits plutôt exceptionnels.

Influence des pluies. — Il est prouvé, par les nouvelles constatations, que le régime des eaux souterraines et de leurs émergences est sous la plus étroite dépendance des pluies régionales et de leurs variations. Les eaux souterraines ont leurs crues et leurs étiages, qui suivent les écarts des

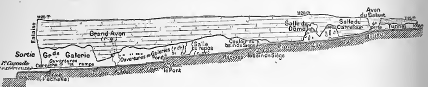


Fig. 16. — Exemple d'une traversée de part en part ; Bramabiau, Gard (1888-92).

pluies et des sécheresses. La théorie allemande de la formation des sources par condensation de l'air atmosphérique (Vogler, Worne), ne me paraît pas admissible.

En définitive l'hydrologie souterraine des terrains fissurés peut maintenant être résumée par la formule suivante :

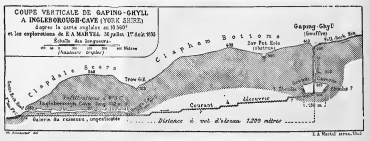


Fig. 17. — Les trois termes de la circulation des eaux souterraines, absorption, emmagasinement. Depuis 1895 de nombreux explorateurs anglais ont révélé tout un réseau de galeries entre le gouffre et l'émergence.

Les eaux d'infiltration y sont absorbées par les pertes, abîmes et fissures du sol, emmagasinées ou écoulées par les cavernes, et rendues ou débitées par les résurgences (fig. 17).

Travail des eaux souterraines. — Quant au travail souterrain de ces eaux, il s'exerce par le triple effet de la *corrosion* (action chimique), de l'*érosion* (action mécanique) et de la *pression hydrostatique* (mise en charge,

sous plusieurs atmosphères, dans les puits naturels ou les diaclases formant réservoirs).

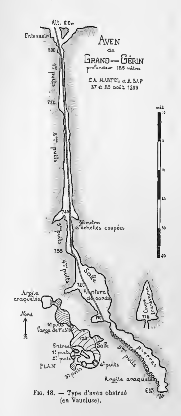


Fig. 18. — Type d'aven obstrué (en Vaucluse).

Érosion et Corrosion. — La longue controverse sur la prépondérance de l'*érosion* ou de la *corrosion* des eaux est absolument oiseuse : la plupart du temps, ces deux modes d'action s'exercent concurremment ; la corrosion l'emportera dans le gypse et le sel gemme par exemple, et l'érosion parmi les grottes des roches volcaniques (silicatées) et des rivages marins. Pour les calcaires, il est impossible de déterminer la part précise de chacun de ces deux modes. En tout cas, *on ne peut plus admettre*), *l'opinion qui voulait que l'action mécanique de l'eau fût écartée comme phénomène générateur des cavernes.*

Absence de nappes d'eau dans les terrains fissurés. — Les innombrables faits qui m'ont conduit à établir ces données ont fait justice en même temps de la fausse croyance aux vraies *nappes* souterraines dans les terrains fissurés. On a voulu qualifier de *nappes discontinues* les récipients d'eau souterrains des calcaires : c'était confesser implicitement la synonymie avec le réseau composé de *pleins* (de *roches*) et de *vides* (à *eau*) alternés ; seulement, pour ne point renoncer au terme dogmatique, on lui accolait un qualificatif qui en fait un non-sens : la caractéristique d'une nappe,

en effet, c'est la continuité sur toute son étendue; dès que la discontinuité y met des mailles, c'est un filet, un *réseau*. La nappe *discontinue* est une réelle entorse au sens des mots! Il importe de proscrire ce terme.

D'ailleurs, et dès 1835, Arago niait l'existence dans les terrains fissurés (calcaires surtout) de véritables *nappes d'eau*, étendues dans tous les sens, comme dans les terrains sablonneux (nappes phréatiques, artésiennes, Grundwasser, etc.). Daubrée a insisté aussi pour réclamer l'abandon du mot *nappes d'eau* dans le calcaire. J'ai matériellement démontré, par mes explorations, combien était juste cette idée des deux grands savants; on ne doit appliquer l'expression *nappes d'eau* qu'aux terrains meubles, fragmentaires, incohérents, détritiques, où il y a réellement *imbibition* de toute la masse, grâce à son peu de cohésion et au rapprochement extrême des interstices. — Dans les calcaires, les réserves liquides s'accumulent et circulent dans les poches, les couloirs, les galeries, les cheminées, que séparent les unes des autres, à des distances souvent kilométriques, les parties par elles-mêmes *compactes* (sauf en ce qui concerne l'*eau de carrière*): les *réseaux*, *poches* et *courants* sont la vérité empiriquement établie maintenant. C'est ainsi que Vaucluse est le débouché d'un *fleuve souterrain* (fig. 20) et non pas l'*affleurement* d'une *nappe*, quoi qu'en dise la légende de la feuille *Forcalquier* de la Carte

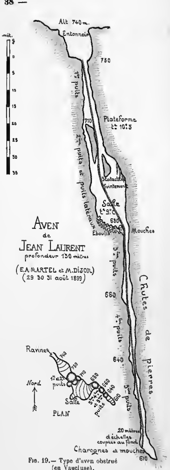


Fig. 19.— Type d'aven obstrué (en Vaucluse).

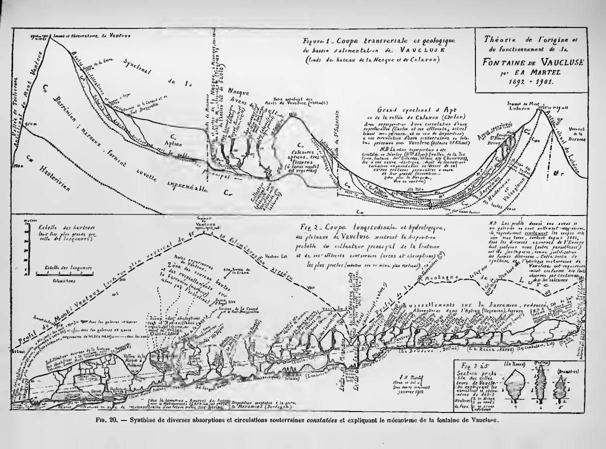


Fig. 20. — Synthèse de diverses absorptions et circulations souterraines *constatées* et expliquant le mécanisme de la fontaine de Vaucluse.

géologique de France au 80.000ᵉ, etc. Les plus grands *lacs* souterrains connus n'atteignent pas 100 mètres de largeur, et, *dans la forme des réservoirs naturels du calcaire, ce sont toujours longueur, hauteur et étroitesse qui l'emportent de beaucoup sur la largeur.*

La méeonnaissance de cette loi (1) a fréquemment produit les plus graves mécomptes dans les travaux de forage de puits : forts de leur croyance aux nappes, les hydrauliciens font trop souvent, dans la craie et le calcaire, creuser des puits qui, selon leur pensée, sont toujours *sûrs* de tomber, plus ou moins bas, sur l'eau désirée ; les insuccès, les déboires, les pertes d'argent qui en résultent sont bien plus fréquents qu'on ne consent à l'avouer. Pour les communes pauvres, cela mène à des désastres financiers : en effet, si le forage ne rencontre pas de fissure aquifère, si, comme le disait Arago, « une mauvaise chance vous fait tomber sur une portion de la roche bien compacte, vous avez exécuté un travail inutile ». Malgré toutes les contestations qu'on persistera à soulever, cette parole du grand savant est la vérité absolue.

Plusieurs de mes enquêtes (Breteuil, Eure ; Bouzy, Cramant, La Neuville-au-Pont, etc., Marne, etc.), pour le ministère de l'Agriculture, ont déjà eu pour résultat d'empêcher des municipalités de persévérer dans des travaux notoirement inutiles, conseillés par des entrepreneurs hydrauliques imbus de ces malencontreuses idées.

Multiplicité des zones aquifères. — En contre-partie, j'ai parfois constaté, en pleins massifs montagneux, l'existence de plusieurs zones aquifères superposées (comme dans les sondages atteignant de vraies nappes des sables), dues à l'intercalation de diverses couches marneuses imperméables.

Par exemple, entre 400ᵐ et 1300ᵐ, les montagnes calcaires d'Arbas (Hte-Garonne) (nᵒ **63, 73**), sont percées de cavités et pourvues de sources *à tous leurs étages*. Il n'est pas permis d'y appliquer les termes, toujours erronés pour les calcaires, de *nappes d'eau*, de *niveau hydrostatique* ou de *niveau piézométrique* ; ce sont la loi de pesanteur, le travail mécanique et chimique de l'eau, le caprice des fissurations et le hasard des interstratifications imperméables qui régissent, là comme dans tous les terrains crevassés, la circulation des eaux souterraines, en déroutant souvent les plus rationnelles prévisions.

En bien des endroits j'ai signalé aussi l'existence de cloisons tout à fait étanches, l'absence d'anastomose, l'indépendance d'eaux souterraines de niveaux différents quoique très voisines, par exemple à la grotte de Cacouette (Basses-Pyrénées) (nᵒˢ **54** et **73**).

(1) Dans une *étude sur la saturation hygrométrique de l'écorce du globe* (*Annales des Mines*, juillet 1897, p. 32-87), M. Keller énonce que « les grottes vides *en contact avec la partie supérieure* « *d'une nappe aquifère* se remplissent d'eau et se vident alternativement, suivant que la *nappe* elle- « même se gonfle ou se dégonfle » ! ! — Le professeur Penck a bien fâcheusement accepté l'insoutenable théorie du Dʳ A. Grund sur la nappe phréatique ou Grundwasser du Karst autrichien (119, 128).

En résumé, il est désormais permis de dire que, satisfaisant au desideratum de Daubrée, on connaît maintenant, *de visu*, dans la limite de quelques cents mètres de profondeur tout au moins, l'allure générale, le mécanisme et les lois principales de la circulation des eaux absorbées parmi les fissures des terrains (calcaires principalement), — qu'on a observé sur le fait le mode intérieur de transformation des pluies en sources, — et qu'on est arrivé à l'établissement, véritablement définitif, des principes suivants :

Les eaux souterraines qui donnent naissance aux puissantes et nombreuses émergences des calcaires ne s'étendent pas en grandes nappes, ne s'accumulent pas tout d'abord en vastes réservoirs ; elles descendent par chute directe (fig. 21) dans les pertes et avens ou par infiltration à travers les fissures ténues ; puis elles se réunissent en minces ruisselets, qui se gonflent en se réunissant, et en recueillant les suintements de leurs voûtes, et qui circulent enfin, réelles rivières, dans de longues galeries, hautes ou basses, étroites ou larges, selon la nature du terrain traversé, — les fractures du sol ayant joué le premier rôle et *dirigé* le travail ultérieur des eaux.

B. — Hygiène publique et maladies transmissibles. Contamination et protection des sources dites vauclusiennes. Pollution par les abîmes et les absorptions (Résurgences).

Le résultat le plus important de mes explorations souterraines concerne l'hygiène publique et les maladies transmissibles.

J'ai révélé, en effet, une cause toute spéciale de contamination des grandes sources des terrains calcaires, ainsi que des épidémies ou maladies qui en résultent. Cette cause dérive conjointement de la fissuration du sous-sol (dont le rôle devient ici capitalement préjudiciable) et de divers facteurs sociaux (accroissement des populations agglomérées ; extension des moyens artificiels de culture ; développement des industries, etc.). J'ai fourni la synthèse, *aussi courte que possible*, de ce qui concerne *l'hygiène des eaux souterraines*, dans mon mémoire l'*Eau* (XIII), publié en **1906**, dans le traité d'hygiène (fasc. II) de Brouardel et Mosny.

Déjà, en 1889, M. R. Moniez s'était rendu compte à Lille, en examinant le dépôt du fond des puits les mieux fermés, « de la très insuffisante filtration que subissent les eaux de la surface qui viennent alimenter les nappes souterraines. »

En 1890, M. Ed. Dupont, le géologue belge, indiquait que des rivières, d'abord extérieures, puis englouties, comme la Lesse, dans la grotte de Han, ne pouvaient pas ressortir des cavernes à l'état filtré, mais qu'elles devraient être tenues pour suspectes et nuisibles, quant à l'alimentation humaine. La même année, Brouardel et le Dr Thoinot suspectaient aussi les eaux du Havre, à cause des épandages de fumier sur les plateaux cauchois et de la fissuration de la craie, déjà signalée par Meurdra, en **1877**.

A partir de 1891, j'ai définitivement fixé la question et montré le danger universel des sols fissurés, en l'étendant aux abîmes et à tous les points d'absorption quels qu'ils soient (**6, 22, 28, 43, 50, 53, 64, 68, 70, 87, 184, 185, etc.**)

Car j'ai constaté partout que les babitants des montagnes et campagnes

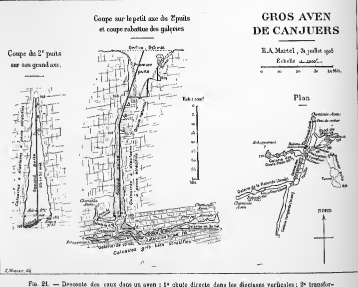


Fig. 21. — Descente des eaux dans un aven : 1° chute directe dans les diaclases verticales ; 2° transformation de la descente en écoulement subhorizontal et en galeries basses et étroites, dans les joints de calcaires très stratifiés.

avaient l'habitude de se servir de ces trous comme de dépotoirs, et d'y jeter toutes sortes d'immondices, notamment les bêtes mortes (fig. 22 et 23.)

Or, quand un ruisseau souterrain circule ou prend naissance dans le fond du gouffre ou de la perte (même par communication indirecte, v. p 30), il arrive fatalement que l'eau, délavant ces cadavres et souillures, devient le *véhicule de leur décomposition*, et qu'elle parvient *dangereusement polluée* à la source où elle voit le jour. Il s'ensuit que les pluies, drainées par les puits naturels et absorptions, commencent par rincer toutes ces charognes

et immondices en confluant vers les rivières souterraines, et y apportent des ptomaïnes. toxines et microbes nocifs, avant de se rendre aux émergences qu'elles contribuent à alimenter. Le pire désagrément de nos descentes d'abîmes (les chutes de pierres mises à part) était toujours l'atterrissage et la manœuvre au milieu du magma de squelettes et de *gras des cadavres* remplissant le fond de presque tous les gouffres ! Comme conséquence directe, la contamination des fontaines naturelles est de nature à provoquer

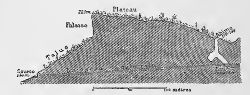


Fig. 22. — Abîme de la Berrie et source de Graudenc (Lot, 1892).
Coupe prouvant matériellement la contamination d'une source par un abîme.

les plus graves épidémies. Jusqu'à nos jours ce fait ne pouvait guère frapper les esprits. C'est en effet la moderne découverte, par Pasteur et son école, du rôle et du danger des microbes, qui a fait naître la théorie de l'*origine hydrique* de certaines maladies épidémiques (*transmissibles* plutôt, selon l'expression nouvelle) : fièvre typhoïde, choléra, dysenterie, voire peste et diphtérie ; de cette théorie les principaux protagonistes furent le professeur Bouchard (1877), Dionys des Carrières, Arnould (1882) Rubner, Duclaux, le regretté professeur Brouardel surtout (Congrès de Vienne, 1887), Roux, Thoinot, etc. Le choléra de Hambourg (1892), acheva de fixer l'opinion. De telle sorte que l'on aboutit, pendant le dernier quart du XIXe siècle, à jeter le trouble le plus profond dans les notions jusqu'alors reçues sur l'*hygiène des eaux potables*, quand on eut bien et dûment établi la double constatation : 1° du danger présenté par les mauvaises eaux comme véhicule des plus graves maladies (1) ; 2° de l'incapacité d'une grande partie des terrains à fournir des eaux naturellement saines et pures, faute de filtrage dans des fissures trop largement ouvertes.

Sous ce deuxième point de vue, les faits probants se sont d'ailleurs multipliés par milliers et dans tous les pays du moude.

Fausses sources ou résurgences. — Aujourd'hui donc les hygiénistes

(1) Il ne faut pas méconnaître d'ailleurs que d'autres causes peuvent propager les dites maladies : lait, légumes frais, fosses d'aisances, égouts, démolitions, terres remuées ; contagion directe dans les milieux malsains, — porteurs de germe, — surmenage, — encombrement (surtout dans les casernes), — — vers intestinaux (état de l'organisme humain), etc.



FIG. 23. — Abîme transformé en charnier et contaminant, après les pluies, les eaux souterraines régionales.
(Gouffre des Corbeaux, près Bélesta, Ariège : profondeur 110 mètres ; 1907.)

ont dû reconnaître (et les expériences de coloration à la fluorescéine (1), ont achevé de prouver) *que les sources du calcaire ne sont pas de vraies sources*, telles que celles filtrées dans des terrains perméables par imbibition ; il est avéré que, par les fissures du calcaire *et même de la craie*, les eaux d'infiltration peuvent véhiculer, d'amont en aval, les germes des plus graves maladies épidémiques, notamment la fièvre typhoïde. C'est pourquoi j'ai proposé (en 1900, V) de retirer aux grosses fontaines du calcaire la privilégiée qualification de *source* et de les nommer *résurgences*, terme qui implique l'idée d'un retour à la surface du sol, aprés une première circulation extérieure et une seconde intérieure

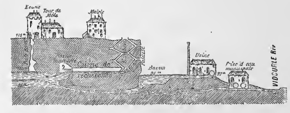


Fig. 24. — Contamination du captage de Saine (Gard) par une écurie (1897) coupe verticale.

Perforation des zones marneuses. — Un instant on s'était pris à espérer que, dans certains cas, les résurgences pouvaient être naturellement protégées, contre les infiltrations polluantes, par des intercalations de zones marneuses *au dessus* du gisement géologique des émergences ; on avait pensé que ce *toit* imperméable, analogue à celui des eaux artésiennes, pourrait éviter, au moins par places, les contaminations proximes.

Malheureusement j'ai encore constaté, sous terre, et en plusieurs endroits (**50 63, 73**), que cette hypothése de l'étanchéité des marnes intercalaires est contredite par la matérialité des faits, au moins pour les masses calcaires dont le niveau dépasse celui des plans de drainage extérieurs. Même dans les régions les moins disloquées, la continuité protectrice des marnes ne saurait être affirmée nulle part.

Si bien que, à cause de ces *défauts*, bien plus répandus qu'on ne le croit, les soi-disant zones imperméables sont plutôt, en principe, non pas un *filtre de colmatage*, mais simplement un *défectueux percolateur qui laisse passer le marc*.

S'il en était autrement, il y aurait, du haut en bas des falaises des cañons calcaires, des étages superposés de cascades émergentes, correspondant à chacune des récurrences marneuses de la formation. Or, ce phénomène est, au contraire, plutôt rare ; presque tous les affluents souterrains de

(1) Dans le captage de Sauve (Gard), « les habitants boivent leur propre égout » (v. n° **22**). (fig. 24).

ces cañons se manifestent au niveau du thalweg, jusqu'auquel ils ont pu descendre grâce aux craquelures intérieures. Aussi, peu d'obstacles les empêchent d'amener aux soi-disant sources tout le *marc* des vallées fermées et des plateaux d'amont : nitrites, matières organiques, toxines, ptomaïnes et microbes, germes des maladies transmissibles.

La conclusion hygiénique est donc formelle : *dans les régions dépourvues de terrains réellement filtrants et, par conséquent, de vraies sources, il est indispensable d'instituer dans le bassin d'alimentation des eaux à capter, une surveillance et un périmètre de protection sûrs contre les causes de pollution, et, si cela ne paraît pas possible, il faut se résoudre à la recherche et à l'application d'un efficace et définitif procédé de purification : l'une ou l'autre de ces mesures s'impose absolument comme une inéluctable nécessité hygiénique et sociale* (**70**, **184**, **185**).

Exception des sources pures dans les calcaires crinoïdiques et dolomitiques.— Toute régle comportant des exceptions, les recherches de M. E. van den Broeck ont fait connaître que, dans des conditions géologiques trés spéciales, certaines sources des calcaires belges sont de bonne qualité ; et je me suis empressé de reconnaître avec lui (**64**, XIV) qu'en bien des cas, les eaux souterraines même de régions calcaires peuvent être employées *sûrement* pour l'alimentation publique .. C'est un précieux tempérament apporté à une suspicion légitime, qui commençait peut-être à verser dans l'excés des proscriptions exagérées. Aprés avoir eu trop confiance dans les « sources », si souvent impures, quoique limpides, des calcaires, on arrivait à professer exagérément l'opinion opposée : de là des embarras inextricables, hygiéniques et financiers, pour les captages d'eaux, et des découragements qui conduisaient *à ne plus rien faire parce qu'on voulait trop bien faire*. Les nouveaux faits établis par M. van den Broeck montrent bien que, comme en toute conception, la vérité et la sagesse se rencontrent entre les extrêmes...

En Belgique, il est établi qu'une véritable filtration des eaux s'opère au sein des roches crinoïdiques de l'étage *Tournaisien*, du Calcaire carbonifère, et des roches crinoïdiques, ou dolomitisées, de l'assise inférieure de l'étage *viséen*.

Ce filtrage est réalisé par les résidus siliceux (sableux ou organiques) très fins qui ont colmaté les fissures aquifères. Il se pourrait que, dans les dolomies des Causses, la même amélioration se présentât naturellement (le cas s'est rencontré dans la forêt de Haye pour les eaux de Nancy, quoique avec une déception notable au point de vue de la quantité).

Mais, *en principe*, il ne faudra jamais perdre de vue cette régle de prudence, admise (voir mon rapport, **184**) par le Congrès d'hygiène de Bruxelles en 1903, que « les alimentations au moyen d'eaux issues des terrains calcaires doivent être l'objet d'une attention particulière, en raison des imperfections *possibles* du filtrage dans les terrains fissurés »,

Conséquence hygiénique des constatations sur la circulation des eaux souterraines. — Telle est donc la principale conséquence de la découverte du réel mode de circulation des eaux souterraines à travers les terrains fissurés (surtout les roches calcaires et crétacées), si répandus sur toute la surface du globe ; elle contraignit à admettre que, dans les sous-sols de cette nature, les *venues d'eau* ou *émergences*, considérées jusqu'alors comme des *sources* très pures, très saines (en raison de leur limpidité, fraîcheur et composition chimique), n'étaient pas, la plupart du temps, *pures comme de l'eau de roche* : simples réapparitions de ruisseaux ayant déjà coulé au dehors et momentanément perdus en terre, ou bien provenant directement des infiltrations pluviales à travers les fissures du sol, elles jaillissent trop souvent chargées de toutes les impuretés qu'elles ont pu recueillir avant de pénétrer dans le sous sol ; il en est ainsi parce que, d'une façon générale, les crevasses de ce sous-sol sont trop larges pour retenir ces impuretés, en un mot, parce que *les terrains fissurés*, contrairement à ce que l'on professait jusqu'à la fin du XIXe siècle, *ne sont pas filtrants* comme le sont les *sables*. D'où cette conséquence que, par le véhicule des eaux engouffrées, les maladies transmissibles d'origine hydrique peuvent passer d'une contrée à l'autre, à travers de longues étendues de sous-sols et de gouffres, de cavernes et de rivières souterraines, d'accès plus ou moins difficile.

En tous pays la révision du bassin alimentant les grosses résurgences calcaires, trop souvent coupables de méfaits épidémiques, a toujours abouti à la découverte d'absorptions polluées plus ou moins distantes (Avre, Besançon, Paderborn, etc., etc).

Et, dans maints ouvrages de géologie, d'hydrologie, ainsi que dans les rapports officiels, on commence nettement à distinguer les *résurgences* du calcaire des vraies *sources* des sables, les seules qui représentent des sorties d'eaux vraiment pures, impliquant l'idée de garantie sanitaire.

Voilà pourquoi, dès le 21 mars 1892, devant l'Académie des Sciences même **(6)**, je formulais les deux vœux suivants :

« 1° Connaître quels sont, dans les régions calcaires de France, les puits naturels susceptibles de communiquer plus ou moins directement avec les eaux souterraines qui alimentent les sources ;
2° Interdire, soit administrativement, soit par des dispositions légales nouvelles, le jet des immondices et des bêtes mortes dans les gouffres où une communication aura été reconnue (1). »

En raison de la gravité du sujet, on me permettra de rappeler comment j'ai eu la joie d'être publiquement et efficacement écouté.

Mesures et précautions prises depuis 1900 pour la protection des eaux potables. — Le 18 novembre 1898, au Sénat, sur une interpellation de

(1) « Accessoirement même, on éviterait encore de cette manière : 1° les accidents fréquents qui résultent des chutes fortuites de bestiaux ou de personnes dans ces trous souvent béants au milieu des champs ; 2° l'essaimage des mouches et insectes venimeux que la présence des carcasses attire au fond et aux abords des abîmes. »

M. le Dr Labbé, à propos de l'épidémie de fièvre typhoïde de la garnison de Lure, le ministre de la Guerre (alors M. de Freycinet), déclara :

« Vous avez sans doute entendu parler des remarquables travaux de M. Martel, qui a démontré que des sources considérées comme excellentes produisent des ravages, parce qu'elles reçoivent de la surface du sol une quantité de corps étrangers qui sont, par l'eau qu'elles débitent, autant de causes de putréfaction. Il a été fait toute une série de travaux et d'études de ce genre » (pour la Guerre et l'Intérieur). « Grâce à ces études nous serons éclairés sur la valeur réelle des sources qui sont à tort réputées comme bonnes et autour desquelles il se produit néanmoins des cas de fièvre typhoïde. » (*Jour. officiel*, 19 nov. 1898.)

Je n'ai pas manqué de saisir cette occasion pour obtenir sans délai (sous les auspices de A. Cornu), des audiences de MM. les ministres de la Guerre et de l'Intérieur, président du Conseil (M. Charles Dupuy) et du sous-secrétaire d'État à l'Intérieur (M. Legrand) et pour leur exposer l'intérêt de la question et le plan des mesures à prendre. Au début de janvier je leur remis, ainsi qu'à divers membres du Parlement, une note explicative **(87)**, proposant :

1° Une circulaire du Ministre de l'Intérieur, enjoignant aux préfets de prendre des arrêtés pour interdire le jet des bêtes mortes dans tous les abîmes ou puits naturels du territoire français ;

2° La détermination d'un périmètre de protection autour des puits d'absorption, des goules et pertes et des points d'émergence des fausses sources ;

3° L'affectation de crédits, pour faire terminer l'exploration des cavités souterraines innombrables où l'on n'avait pas encore pénétré ;

4° La détermination (au fur et à mesure de l'avancement de cette enquête *sous* le terrain et de la construction de cet « Atlas », en quelque sorte, des cavités et rivières souterraines de la France), avec le concours des Ministres de la Guerre, des Travaux publics et de l'Agriculture, des points spéciaux sur lesquels devraient être effectués, principalement aux frais des communes ou des départements intéressés, les travaux de protection, d'aménagement, d'adaptation, de correction, pour la meilleure utilisation et la sécurité complète des eaux reconnues et étudiées.

A la séance du 30 janvier 1899, de la Chambre des députés, M. Jourdan, député de la Lozère, posait au Ministre de l'Intérieur une question résumant les faits. Voici la réponse du sous-secrétaire d'État, M. Legrand :

« La question est des plus sérieuses et mérite toute l'attention de la Chambre.

« J'ai eu, ces jours derniers, une conversation avec M. Martel, qui m'a montré comment la contamination de sources réputées pures pouvait se produire au moyen de ces cavernes, de ces sortes de dépotoirs ruraux, où l'on enfouit toutes espèces d'objets. Des épidémies dont on ne trouvait pas l'origine ont précisément leur cause dans la communication du gouffres avec les sources.

« J'ai pensé que le ministère de l'Intérieur, que le service dont j'ai la haute direction, devait s'occuper immédiatement de cette question, et j'en ai saisi le Comité d'hygiène publique de France.

« Ce Comité donnera un avis motivé ; il nous dira s'il y a lieu, d'après lui, d'inscrire un crédit spécial au projet de budget du ministère de l'Intérieur pour 1900, afin que ces études soient poursuivies et qu'on puisse aboutir à des résultats pratiques.

« Le Gouvernement, je puis en donner l'assurance à la Chambre, ne négligera rien pour que toutes les mesures utiles soient prises, afin de protéger à cet égard la santé publique en France. Je donne à la Chambre des garanties formelles en ce qui concerne cette étude par le Comité consultatif d'hygiène de France et les intentions du Gouvernement. »

(*Journal officiel* du 31 janvier 1899.)

Cette officielle et publique promesse fut scrupuleusement tenue et immédiatement sanctionnée par les mesures successives suivantes :

A.) Enquête sur les eaux de Paris, prescrite le 1[er] mars 1899 par le Préfet de la Seine ; elle a consacré le principe (posé par Duclaux) et fait établir la pratique de la *surveillance médicale* des régions à infiltrations éventuellement dangereuses ;

B.) Nomination d'une Commission (10 avril 1899) chargée d'étudier les moyens de protéger les sources ;

C.) Circulaire du ministre de l'Intérieur, du 10 décembre 1900, prescrivant, pour tout captage d'eau potable, l'étude géologique préalable du bassin d'origine des eaux, et l'analyse chimique et bactériologique (1) ;

D.) Loi du 15 février 1902 sur la protection de la santé publique, qui stipule l'établissement d'un *périmètre de protection* pour les captages d'eaux (art. 10), et qui interdit le jet des bêtes mortes et ordures dans les abîmes et puits (art. 28) ;

E.) Commissions, mesures, études instituées par le ministère de l'Agriculture, et particulièrement par M. Ruau, pour tout ce qui concerne l'investigation des eaux souterraines et le perfectionnement des adductions.

(Comité d'études scientifiques près l'Hydraulique agricole ; décret du 23 mars 1905 ; ce Comité, dû à l'initiative et placé sous la direction de M. L. Dabat, est divisé en plusieurs sections, dont une est particulièrement consacrée aux eaux souterraines ; et il désigne chaque année les recherches qui devront être entreprises aux frais du ministère.

Entre temps, M. Schloesing (*C. R. Acad. Sci.*, 13 avril 1896), Duclaux, L. Janet (*C. R. Acad. Sci.*, 23 juillet 1900), Berthelot (*C. R. Acad. Sci.*, 19 août et 2 décembre 1901), le Congrès d'hygiène de Bruxelles (1903), etc. admettaient aussi la nécessité de surveiller et protéger les sources des terrains calcaires. Et, à la fin de 1903 (*Journal officiel* du 15 novembre), l'Académie de médecine, dans un rapport demandé par le Ministre de la Guerre sur l'alimentation des garnisons en eau potable, s'exprimait ainsi :

Personne ne conteste que les eaux d'alimentation sont le principal véhicule des germes typhoïques. Tout le monde est donc d'accord sur la nécessité de donner aux populations une eau irréprochable.

Naguère encore, on se faisait des sources une idée trop simpliste. Les récents travaux de MM. Martel, Janet, etc. ont montré la complexité du parcours et des accumulations des eaux souterraines, l'origine, le mécanisme et la fréquence des cavernes vauclusiennes de la craie fissurée, la possibilité de leur mélange avec les eaux de surface, leur souillure par les eaux de lavoirs, des égouts, par les fumiers que laisse passer le lit poreux des ruisseaux dans certains villages où les selles de malades atteints de fièvre typhoïde sont déversées sans aucune précaution sur le sol. L'infection des lacs ou torrents souterrains résulte encore

(1) En 1901 M. Michel Lévy a bien voulu me comprendre, pour l'examen géologique des captages des départements de la Marne, l'Aube et l'Eure, au nombre des collaborateurs des services de la carte géologique gratuitement et exclusivement chargés de ces inspections. — Le 15 juin 1903, sur la proposition de MM. Michel Lévy et le professeur Gariel, j'ai été nommé auditeur au Conseil supérieur d'hygiène publique, dont je suis devenu membre titulaire le 5 janvier 1909.

de la projection des ordures ménagères, des résidus de la vie, des vidanges, des cadavres d'animaux dans les fissures, gouffres, abîmes, mardelles, bétoires naturels ou artificiels, si communs dans la craie, mais qui ne sont pas exclusifs à ces terrains.

Une source n'est bien protégée que si on lui assure un périmètre de protection, d'où sont exclus les habitations, les cultures, les engrais fertilisants provenant de l'homme ou des animaux. En 1899 et 1900, on vit reparaître à Paris une proportion annuelle de 31 à 32 décès par fièvre typhoïde sur 100000 habitants, alors que, pendant les quatre années précédentes, cette proportion n'avait pas dépassé 10 à 11; il fut démontré que cette épidémie était imputable à l'altération de l'eau des sources de la Vanne, qui, jusqu'alors, était réputée de qualité excellente. La confiance dans les eaux de source fut ébranlée; en face des révélations de M. Martel sur le régime des eaux souterraines, un certain nombre de savants se demandèrent s'il ne fallait pas, au moins dans les terrains de la craie, soumettre toutes les eaux de source des grandes villes à des moyens artificiels de purification (bassins filtrants de sable, ozone, etc.).

C'est alors que le préfet de la Seine, par un arrêté du 1er mars 1899, nomma une commission scientifique de perfectionnement dite de « l'Observatoire de Montsouris »; un arrêté du 14 mai 1900 créa un « service local des sources de la ville de Paris ». Ces deux organes fonctionnent, avec des résultats excellents, tant au point de vue de l'aménéc et de la production de l'eau qu'au point de vue de la surveillance médicale et hygiénique des régions où s'alimentent les eaux captées.

La question était donc jugée, et le résultat atteint. Mais, si heureuses que fussent déjà toutes les opinions, mesures et prescriptions ci-dessus, elles étaient encore insuffisantes.

En 1905, au Congrès de l'Association française pour l'avancement des Sciences, à Cherbourg (**102**), j'ai demandé :

1° L'interdiction ou tout au moins la réglementation des puisards absorbants artificiels ;

2° L'abrogation de l'article 32 de la loi de 1902 qui précise que « la présente loi n'est pas applicable aux ateliers et manufactures ».

Conséquence : 1° une usine a dans son enceinte un gouffre ou un abîme, une distillerie possède une bétoire ; elle y jettera toutes ses eaux usées, toutes ses vinasses, et contaminera les eaux souterraines d'une région entière ; 2° elle peut capter une mauvaise source ou creuser un puits détestable, qui rendra malades ses ouvriers et répandra au dehors des maladies transmissibles ! C'est permis ! Les industriels échappent à la loi.

3° La surveillance des captages d'eaux militaires ;

4° La surveillance des captages d'eaux des arsenaux et établissements de la Marine.

Le 1° est réglé par le projet de loi (déposé à la Chambre des députés le 24 décembre 1910 par M. le Ministre de l'Agriculture) sur la protection des cours d'eau non navigables ni flottables, des sources et des nappes souterraines, qu'a préparé une Commission spéciale, nommée au ministère de l'Agriculture par décret du 22 mars 1907 ;

Le 3°, par la circulaire du 25 décembre 1907 créant au ministère de la Guerre un *Conseil supérieur de surveillance des eaux d'alimentation destinées à l'armée* ;

Le 4°, par la circulaire du 15 septembre 1909 créant au ministère de la

Marine une *Commission supérieure pour la prophylaxie des maladies infectieuses et la surveillance des eaux d'alimentation de la marine* (1).

Mais il reste encore à surveiller et réglementer *les captages d'eau des usiniers* (v. 2°), *ceux des écoles* (puits souvent dangereux) par le ministère de l'Instruction publique, *ceux des gares et stations des chemins de fer et particulièrement des passages à niveau* (puits fréquemment contigus à des latrines ou à des fumiers) par le ministère des Travaux publics.

Enfin tout ce qui concerne l'emplacement des cimetières ; l'incinération des ordures ménagères ; la crémation des morts (indispensable); le tout-à-l'égout (qui empoisonne les rivières) ; la pratique de l'épandage (absolument funeste dans les terrains fissurés). Pour y parvenir, il faudra faire front contre des libertés, des préjugés, des habitudes, des réputations fâcheusement cristallisés, etc., etc.

En attendant, *un résultat est déjà obtenu* : avec ce qu'on a déjà fait, grâce aux découvertes et progrès de la bactériologie et de l'hydrologie sanitaire salutairement alliées, LA MORTALITÉ TYPHIQUE EN FRANCE A DIMINUÉ DE MOITIÉ DE 1891-95 (34 décès pour 100 000 hab.) à 1908 (17 décès pour 100 000) (2). — *Elle peut et doit s'abaisser encore.*

C. — Géographie physique. — Géologie générale. — Minéralogie.

Origine des abîmes ou puits naturels. — L'*origine des abîmes* ou puits naturels, caractérisés avant tout par leur verticalité souvent absolue, avait donné lieu aux plus vives controverses.

Mes recherches ont conduit à cette conclusion irréfutable, qu'il faut les considérer *en principe* comme de colossales *marmites de géant, formées de haut en bas par l'action chimique et mécanique d'eaux violemment engouffrées dans de grandes diaclases verticales* (I, II, III, **4**, **13**, **18**, **19**, **21**; V, IX, XIV, **26**, **41**, **65**, **67**, **68**, **104**, **106**, **124**, **161**, etc.). Souvent ces marmites sont superposées en plusieurs étages, réunis par des couloirs pratiqués dans des joints de stratification (fig. 26)

La théorie des *orgues géologiques*, qui voyait, dans les puits naturels, des entonnoirs de *décalcification*, uniquement dus à la corrosion chimique, est, sous cette forme absolue, inexacte ; il faut, pour être applicable, qu'elle laisse (comme dans toutes les cavernes) à l'érosion mécanique la part considérable due à cette dernière. Dans la craie, cependant, elle trouve de justes applications (Étretat, Maestricht, Poitiers, etc.).

Quant à la théorie *geysérienne* (d'Omalius d'Halloy, Sc. Gras, Marius Bouvier, Lenthéric, etc.), considérant les abîmes comme des *cheminées* d'éruptions geysériennes, d'éjaculations argilo-sidérolithiques, il faut l'abandonner complètement.

(1) J'ai été nommé membre de ces divers conseils et commissions.
(2) Statistique sanitaire du Ministère de l'Intérieur.

Celle des *effondrements*, qui fait des puits naturels les affaissements de voûtes de cavernes au-dessus du cours de rivières souterraines, une formation de bas en haut, conserve encore beaucoup de défenseurs : elle se justifie, en partie, par l'existence de certains immenses gouffres, qui sont manifestement des dômes crevés de grottes ; mais les récentes explorations ont établi le caractère *exceptionnel* de cette formation, qui s'applique certainement à moins de 10 % des abîmes actuellement visités (v. p. 31) !



Fig. 25. — Orifice d'un abîme d'érosion.
(Gros Aven de Canjuers, Var.)

Vallées d'écroulements et inachevées. — A cette question se rattache celle de la formation des cañons par écroulement de cavernes, et des vallées inachevées, qui doivent leur origine tant à des causes d'ordre tectonique qu'aux effets d'une infiltration subitement arrêtée ou considérablement diminuée. Beaucoup de cassures évidées en grottes ont fait voir que, sous l'effort des courants ramifiés, les polyèdres de roches limités par les diaclases se sont

par endroits amincis en piliers, à la mode de l'exploitation des carrières de gypse, et que, rongés au pied, ces piliers peuvent entraîner dans leur chute des voûtes immenses (**4**, **5**, **115**). Il est certain qu'en bien des localités les eaux ont adopté sous terre des directions générales (esquisses de thalwegs futurs), coudées suivant le sens des principales diaclases ou la disposition des failles, et que, par l'agrandissement continu de leurs conduits intérieurs, elles ont pu faire effondrer petit à petit leurs plafonds, comme une voûte dont on enlèverait un à un les supports. Par place, l'écoulement a pu cesser d'être souterrain, l'érosion aérienne continuant seule le travail commencé par le *cavernement*. Et j'ai cité bien des cas, où la première phase de formation d'une vallée n'a pas consisté dans un simple sciage vertical des roches par des rivières creusant leur lit de plus en plus, mais bien dans le développement, puis l'écroulement des cavernes. Les *ponts naturels* (III, **114**, **149**, **165**) en sont le plus souvent d'anciens *témoins* (quand ils ne constituent pas un simple accident postérieur construit par le tuf). Mais toujours les cassures ont été le réseau de trous de mines, utilisé par les eaux courantes pour pratiquer les cavernes, dont les effondrements ont, çà et là, tracé le sillon originaire, l'amorce des cañons dus à cette cause (V). Les cañons du Tarn (**I**), du Verdon (**47**, **68**, **158**), du Pays Basque (**54**, **73**, **74**) ont confirmé en outre le rôle capital joué par les fractures du sol dans la formation des vallées.



Fig. 26. — Coupe des Baumes-Chaudes (Lozère).
(Superposition d'abîmes étagés).

Age des cavernes et abîmes. (**Réduction des eaux**). — Il est beaucoup plus reculé qu'on ne le pensait dans ces dernières années encore.

Déjà en 1870, Cornet et Briart décrivaient huit *puits naturels* immenses (jusqu'à 130 mètres de diamètre, profondeur inconnue), souterrainement rencontrés par les galeries de mines dans le terrain houiller du Hainaut belge, et obstrués de remplissages postérieurs à leur gisement. Ce seraient les plus anciens *abîmes* constatés, en plein groupe primaire.

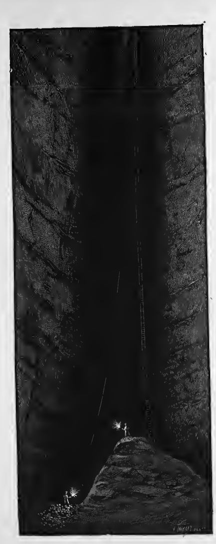


Fig. 27. — Intérieur du gros aven de Canjuers (v. la coupe, p. 39).

En Belgique encore, en 1871, à la mine d'Engis, M. Harzé relevait, à l'étage de 205 mètres, une énorme excavation naturelle, de 85 mètres de longueur sur 15 mètres de largeur.

En 1894, j'ai, le premier je crois, formulé explicitement cette hypothèse (1), à propos des poches à phosphorites du Quercy, que « certains avens « étaient déjà ouverts « béants au commen- « cement de l'époque « tertiaire, c'est-à-dire « que le phénomène « de l'élargissement « des diaclases par « érosion superficielle « avait commencé, dès « lors, sous sa forme « actuelle, dans les « régions calcaires « émergées ». Cette opinion a été formellement adoptée et confirmée par les études et publications ultérieures de MM. Boule, Fournier, Thévenin, Nègre, etc. Il est désormais acquis que les

(1) *Les Abîmes*, page 257; et même plus vaguement, dès 1890, avec de Launay (**80**) dans *Bull. soc. géolog. de France*, 1er décembre 1890, page 165, — et 1892 avec Gaupillat, à propos du Tindoul de la Vayssière (**161**).

poches à phosphorites représentent bien les gouffres et cavernes des Causses à l'époque *oligocène, creusés donc avant cette époque.*

En Belgique, avec MM. E. Van den Broeck, Rahir, Mailleux et L. Bayet, nous avons découvert aussi (1905, v. **48** et XIV) que, sur les plateaux calcaires de Nismes et de Couvin, les excavations naturelles et verticales connues sous le nom local d'*Abannets*, forment des abîmes antérieurs à la période de l'oligocéne inférieur. Ils ont été creusés par des eaux coulant, bien entendu, à un niveau beaucoup plus élevé que celui des plateaux actuels ; ce niveau s'est abaissé au fur et à mesure de la *décapitation*, aujourd'hui complète, de l'ancienne Ardenne, colossalement plus élevée qu'à présent.

Les Abannets prouvent formellement :

1° L'ancienneté trés reculée de la fissuration et du cavernement des calcaires ;

2° Une continuité absolue dans l'enfouissement souterrain et dans la réduction progressive des eaux courantes extérieures.

J'ai même fini par me rendre compte que les situations topographiques paradoxales de nombre de bouches de grottes ou d'avens fort élevés, sur des crêtes ou des plateaux, et d'origine en apparence peu explicable dans l'hypothése de l'absorption de haut en bas (substituée à celle de l'affaissement de bas en haut), n'étaient pas autre chose que les témoins d'une hydrologie ancienne beaucoup plus abondante que celle de nos jours (V. **21**, **124**, **191**).

Ces *engouffroirs*, actuellement surélevés, étaient jadis sur des rives ou sur des hauts fonds de lacs ou courants maintenant taris, et ce sont souvent les mouvements tectoniques, les plissements du sol, qui en ont rompu, déchiré la crevasse primitive, dans la convexité étirée, trop tendue des *anticlinaux*. Les eaux anciennes s'y sont infiltrées dés qu'ils furent entr'ouverts, et n'ont point tardé à les transformer en gueules d'abîmes et de cavernes, actuellement émergées, *suspendues en l'air* en quelque sorte, par suite de la descente ou retraite des eaux ; celle-ci fut provoquée, soit par un phénoméne général de dessiccation, soit par l'approfondissement progressif de vallées drainantes des environs, soit par les mouvements locaux de surélévation du sol abaissant le niveau de base des dites vallées (trés probablement par les trois causes réunies).

Il ne faut pas en conclure cependant que, d'une manière générale, les cavités naturelles du sol ont été creusées à l'époque tertiaire ; il en est de beaucoup plus récentes ; un grand nombre méme continuent à s'approfondir de nos jours : ce sont celles, très souvent à plusieurs étages, où un cours d'eau plus ou moins actif s'est de plus en plus étroitement abaissé dans les fissures du calcaire ; ces cavernes-là *vivent* encore ; d'autres achévent de *mourir* en s'obstruant, et la plupart sont tout à fait *mortes* (les *abîmes* notamment). — Comme les soleils (les bleus, les jaunes et les rouges) et comme l'univers entier, les cavernes sont donc soumises aux lois grandioses et mystérieuses de l'*évolution* !

Ainsi, le creusement des cavernes, surtout hydrologique, ne saurait être limité à la seule époque quaternaire, comme on l'a trop longtemps professé : c'est un phénomène de longue étendue qui, avec une considérable déchéance, se continue sous nos yeux (**35**, **98**).

Leur aspect intérieur dénonce partout plusieurs périodes de développement, généralement plus intense qu'à l'époque actuelle.

Des ravinements souterrains complexes s'observent à même de leurs dépôts alluvionnaires, comme indice de divers âges de creusement.

Remplissage des cavernes. — Un phénomène évolutif actuel des cavernes est celui qui tend à leur obstruction. Sur le *mode de remplissage des cavernes*, si bien esquissé en 1842 par Desnoyers et complété par M. Boule en 1892, il faut abandonner les vieilles idées de cataclysmes et d'inondations diluviennes, et considérer le remplissage comme effectué surtout par l'introduction des terres superficielles, à travers les fissures des voûtes de grottes, sous l'influence de précipitations atmosphériques plus abondantes qu'à présent.

Le remplissage s'opérant différemment suivant la nature des cavités, il y a lieu de distinguer et de ranger dans l'ordre d'importance que voici, les multiples facteurs de ce remplissage (v. nº **181**) :

1º Apports extérieurs (anciens ou contemporains) par les fissures des voûtes ;

2º Éboulement par délitement des roches encaissantes, sous l'action des eaux d'infiltration ;

3º Effondrements par grandes masses, dus surtout aux rivières souterraines ;

4º Décalcification produisant la terre rouge ;

5º Obstruction par les stalagmites et stalactites ;

6º Entraînement d'alluvions extérieures et de débris organiques dans les abîmes et points d'absorption ;

7º Formation de tufs au débouché des résurgences ;

8º Amoncellement de neiges et glaces dans les puits à neige et les glacières naturelles ;

9º Amoncellement des ossements d'animaux (tombés ou jetés, vifs ou morts) et débris divers dans les abîmes.

Les concrétions. — Les *concrétions* (stalagmites et stalactites), manifestation d'ordre secondaire, nous ont aussi, quoique depuis longtemps expliquées, appris bien des choses nouvelles, quant aux détails et mécanismes de leurs formes très diversifiées (1).

(1) Nous avons découvert les deux plus grandes stalagmites que l'on connaisse : la *grande stalagmite* de l'*Aven Armand* (Lozère, 1897), haute de 30 m., et le *monument* de l'abîme *Caougno de los Gouffios* (Ariège, 1909), haut de 25 à 30 m. (La tour astronomique de la grotte d'Agtelek (Hongrie), a 25 m., d'après ma propre mesure au moyen d'une montgolfière, 1898).

Trop d'auteurs ont considéré l'épaisseur et la hauteur des stalagmites comme susceptibles d'une évaluation chronologique. Cependant Desnoyers (1847), Boyd Dawkins (1874) en Angleterre, Claussen au Brésil, avaient déjà reconnu l'irrégularité de leur formation. J'ai montré (**99**) que toute évaluation est matériellement impossible à cause des conditions infiniment variées (topographiques, météorologiques, hydrologiques, physiques, chimiques même) qui les régissent.

On a vu des stalactites de 0m,60 à 0m,80 de longueur se construire en vingt-deux ans à la voûte des réservoirs d'eau potable de Bayreuth. Certaines mesures semblent indiquer que des milliers d'années, au contraire, ont été nécessaires pour l'édification de grandes stalagmites. De très minces revêtements peuvent être fort anciens, d'autres, très épais, tout à fait modernes !

J'ai expliqué (**99**) comment il importe, *particulièrement en matière de fouilles paléontologiques et préhistoriques*, de n'attribuer *aucune valeur absolue* à l'épaisseur des couvercles de calcite ; ils ne doivent jamais être considérés comme un élément de chronologie dans les cavernes.

Concrétions ex-centriques. — Une forme spécialement bizarre de concrétions n'a pas encore été bien expliquée : c'est celle où la calcite figure des saillies ou pointes obliques renversées et même horizontales, souvent très proéminentes. C'est en Amérique, à la Wyandotte-Cave (Indiana), que M. Collett paraît les avoir signalées le premier (1878) ; le Dr Brezina les expliquait par des changements de sens des courants d'air (1), qui poussent tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, les gouttelettes d'eau soumises à l'évaporation. Mais cette interprétation est contredite par l'existence et la croissance actuelle de ces concrétions *ex-centriques* (tel est le vrai nom adéquat à leur défaut d'axe vertical) en des endroits dépourvus de tout courant d'air; dans les autres cavernes où on les a constatées (bien plus fréquemment qu'on ne le croit), il semble même que le calme absolu de l'atmosphère souterraine soit nécessaire à leur formation.

Selon M. Van den Broeck, celles de la grotte Rabozée (Belgique) semblent « avoir été soustraites aux lois de la pesanteur, en présence d'une lutte entre celles-ci et les forces de *l'action cristallisante*, qui l'a emporté haut la main ».

Feu W. Prinz a développé cette théorie d'une prédominance de la force de cristallisation.

L'*état capillaire* des suintements, *au début* de la formation de ces concrétions arborescentes ou filiformes, ne doit pas y être non plus sans influence. Mais il y aurait lieu de rechercher surtout si l'on n'est point ici en présence d'un phénomène *colloïdal*, ou d'un effet d'*osmose*. L'aspect déconcertant de ces accidents cristallins impose fatalement l'idée d'un rapprochement avec les végétations cellulaires artificielles de Leduc, Burke,

(1) Qui ont suggéré à MM. Barnes et Holroyd (1893) le nom d'*anémolithes* pour ces sortes d'accidents à la Blue-John-Mine (Derbyshire, Angleterre).

R. Dubois, Traube. Leurs caprices ramènent à la fameuse *végétation des pierres* par laquelle Tournefort, il y a 200 ans, expliquait les stalagmites d'Antiparos ! Assurément leur genèse est bien plus complexe et mystérieuse que l'effet des courants d'air, des caprices de cristallisation provoqués par



FIG. 28. — Stalagmite ex-centrique.

des *fungi*, des incrustations de toiles d'araignée ou des accidents de capillarité. (V. les photogr. reproduites en IX, XIV, et **125**).

Les Gours. — Sur le sol de presque toutes les cavernes on trouve des saillies sinueuses, serpentiformes, de carbonate de chaux, entrecroisées et étagées de façon à former d'innombrables et irréguliers compartiments

superposés. La plupart des auteurs et notamment Noulet, à la grotte de Lombrive (Ariège), avaient très faussement pris ces cuvettes (bassins, vagues de la mer, etc.) pour « des dépressions ayant cédé à l'action dissolvante des eaux qui coulent du haut de la voûte (**127**) ». Les types analogues, *en cours de formation* dans toutes les rivières souterraines, m'ont permis d'expliquer que ces *gours*, ou barrages de stalagmite, sont au contraire dus aux effets d'une évaporation souterraine beaucoup plus dense qu'on ne le pensait (v. en **D**) par suite des oscillations de niveau d'eaux légèrement courantes, en voie de décroissement, très calcarifères, sur un sol inégal (Padirac, Labouiche, la Bidouze, etc. V, VI, **15**, **58**, **62**, **73**, **74**, **174**).

Elles sont à sec dans les cavernes *mortes* (Saint-Marcel d'Ardèche, Gargas, Lombrive, Dargilan, etc.), où elles constituent les témoins probants d'une ancienne et active circulation. Leur forme est absolument analogue à celle des cuvettes emboîtées et superposées des sources chaudes du Yellowstone en silice, de Hiérapolis, d'Hammam-Meskoutine, etc. constituées par le même mécanisme, mais à l'air libre.

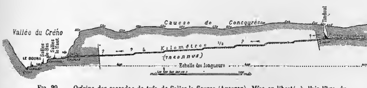


Fig. 29. — Origine des cascades de tufs de Salles-la-Source (Aveyron). Mise en liberté, à l'air libre, du carbonate de chaux sursaturant une rivière souterraine d'un plateau calcaire.

Les tufs. — Les *tufs* ne sont pas autre chose que des stalagmites extérieures : abondants à l'issue de presque toutes les rivières souterraines qui jaillissent en cascades, et même aux pieds et aux bords des chutes de cours d'eau chargés de carbonate de chaux (la Kerka, Dalmatie), ils sont aussi en partie dus à l'intervention de l'air, dans les brusques dénivellations, où il y a à la fois sursaturation en carbonate de chaux et émiettement de l'eau en écume ; celle-ci, éparpillée en infinies gouttelettes, s'évapore avant de retomber sur le sol, où se précipitent seules les particules de carbonate de chaux en excès de suspension, quelquefois sur une grande étendue quand le vent développe ce procédé.

Ces roches n'ont nullement la compacité et la résistance qu'on leur attribue trop souvent. — Car le tuf peut se caverner, par le fait de la fissuration et des infiltrations qui ne tardent pas à l'intéresser.

De nombreux et récents éboulements (**24**) ont montré quelles précautions doivent être prises pour la construction sur des masses de tufs et pour leur exploitation en carrières. J'ai signalé le danger que cela présente pour le sous-sol de Salles-la-Source (Aveyron), de Tivoli (Italie), etc. (IX, 126).

Cette indication doit retenir sérieusement l'attention des services des mines et carrières.

Eaux souterraines de la craie. — Pendant longtemps on a cru que la craie était *poreuse*, c'est-à-dire qu'elle *exsudait* l'eau par ses interstices capillaires et qu'alors le filtrage s'y réalisait; Prestwich, Meurdra, Daubrée (1872 à 1887) ont successivement pensé que, là aussi, c'est la fissuration qui préside à la circulation souterraine. Ici encore les explorations souterraines leur ont donné raison. Plus récemment, MM. Gosselet, Whitaker, Van den Broeck, etc., ont avoué combien il reste encore à apprendre sur ce point particulier, sur lequel, depuis 1901, j'accumule moi-même, en Champagne et en Normandie, des observations qui me permettront prochainement de formuler certains résultats plus positifs que ceux acquis jusqu'à présent. Il en est un que j'ai énoncé sans délai (**30** et **75**) : *en principe, la craie blanche n'est pas plus filtrante que le calcaire.*

Les cavernes naturelles et les rivières souterraines dans les formations crayeuses du bassin de Paris (craie blanche, craie de Rouen, etc.) avaient été jusqu'ici considérées comme un phénomène exceptionnel. M. Ferray, dans l'Eure, MM. Le Couppey de la Forest et Bourdon dans la région des sources de la Vanne, ont étudié d'importants exemples de cours d'eau souterrains en pleine craie.

En 1902, j'ai décrit à Trépail (Marne) une rivière souterraine d'environ 1 kilomètre de longueur, entièrement pratiquée dans les diaclases de la craie blanche à bélemnites. C'est la plus considérable connue dans cette roche. Bien d'autres ont été signalées ou soupçonnées depuis.

Cavernes du gypse et du sel. — La solubilité du gypse et du sel dans l'eau a curieusement aidé la fissuration postérieure à y provoquer des vides, qui ont été la cause ou le théâtre de faits trop souvent désastreux ; fondues et dissociées par le liquide, les masses du gypse se cavernent, créant des porte-à-faux, au-dessus desquels se produisent des effondrements qui retentissent jusqu'à la surface : *fontis* des plâtrières aux environs de Paris, des Catacombes, gouffres de Montigny, etc.; *cloches* de Taverny (Seine-et-Oise), pertes de ruisseaux, etc., etc.

Les excavations naturelles du gypse se révèlent de plus en plus nombreuses ; les entonnoirs d'effondrement de la Maurienne ont certainement contribué aux débâcles de Bozel (1904) et des Fourneaux (1906), près du mont Cenis, etc.

En Dauphiné, on y rencontre de ces entonnoirs de plus de 100 mètres de diamètre et 20 à 50 mètres de creux.

Ces accidents ont l'inconvénient de rendre certaines sources impropres à l'alimentation, par exemple au Cros de Réotier, près Mont-Dauphin (Hautes-Alpes), etc.

A travers toute l'Italie et la Sicile, des pertes, gouffres, cavernes, ri-

vières souterraines, résurgences de formations gypseuses extrêmement étendues, ont fourni des révélations innombrables. La corrosion prévaut sur l'érosion à cause de la nature de la roche : toute une circulation souterraine y agrandit rapidement ses réceptacles, en réduisant proportionnellement la circulation extérieure. Même, selon M. Marinelli, les phénomènes sismiques, si fréquents en Italie, ont pu contribuer au cavernement de ces gypses. Des lacs entiers y sont dus à des effondrements provoqués par la dissolution de couches gypseuses profondes.

Ce sujet d'études est fort important pour la prévision possible d'effondrements éventuels et préjudiciables ; la question présente un intérêt pratique considérable.

Il en est de même pour les grands gisements de sel gemme de Cardona (Catalogne), du Cheshire (Angleterre), d'Allemagne, de Russie, etc.

Grottes naturelles des grès. — Plusieurs cavernes dans les grès triasiques des environs de Brive (Corrèze) (**175**) et le gouffre-tunnel d'Oupliz-Tsiké (Transcaucasie) (X et **38**) ont prouvé que de vraies grottes peuvent être dues, dans les grés, à des causes toutes naturelles. Pour celles de Brive notamment, on les croyait artificielles. L'élément mécanique (la corrosion est évidemment inapplicable aux grès *siliceux*) exerce donc ses effets sur cette roche. On verra (p. 73) quelle application nouvelle j'ai faite de cette notion aux grès de Fontainebleau. Le tunnel d'Oupliz-Tsiké, que j'ai découvert en 1903, est particulièrement remarquable.

Eaux souterraines des granits et schistes. — En Portugal, en Bretagne, dans le Cotentin et le Massif Central de France, j'ai constaté que les eaux souterraines des granits occupent des fissures relativement très peu profondes. De même celle des schistes ne descendent pas loin, et demeurent dans la partie décomposée et très voisine de la surface du sol. Comme conséquence, la plupart des captages d'eaux de ces roches ne sont que de *mauvais drainages*, exposés à une foule de causes de contamination. Mes enquêtes pour le Ministère de la Guerre à Quimper, Saint-Brieuc, Cherbourg, l'ont formellement établi.

Relation des cavernes avec les filons métallifères et les sources thermo-minérales — Une relation entre les filons métallifères et les cavernes est toute naturelle, puisque les crevasses du sol étaient ouvertes, en bas pour la réception des précipitations métallifères, en haut pour l'infiltration des eaux extérieures. Il était forcé que, dans de communes fissures, les effets des deux phénomènes se rencontrassent superposés, juxtaposés, combinés, parfois contrariés.

Aussi les véritables cavernes accidentellement recoupées par des exploitations minières (Lozére, Laurium, Taurus cilicien, Wisconsin, Nevada, etc.) ont-elles trouvé leur contre-partie dans les filons que nous avons acciden-

tellement rencontrés parmi des abîmes, etc. (fer à Bramabiau, cuivre à Bouche-Payrol, Aveyron, etc.). J'ai montré (III et **67**) comment la Blue John Mine (Derhyshire), célèbre gisement de galène et de fluorine (étudié en 1879 par M. Lecornu), n'est qu'un extraordinaire labyrinthe *naturel* de fissures, un réseau d'*avens* superposés, et réunis par des couloirs plus ou moins inclinés, et absorbant encore de nos jours un ruisseau extérieur, qu'on peut suivre jusqu'à 90 mètres de profondeur.

Cette Blue John Mine paraît avoir recueilli primitivement la galène et la fluorine par voie d'émanations profondes ; puis tout son réseau filonien a été, de haut en bas, complètement agrandi et bouleversé par les infiltra-

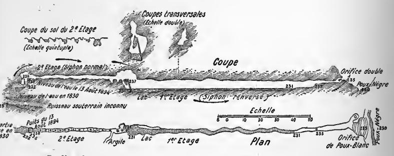


Fig. 30. — Coupe et plan expliquant le mécanisme du trop plein rémittent d'une émergence calcaire (Poux-Blanc, Tarn-et-Garonne). (P. 63.)

tions ultérieures. Ce sont d'ailleurs les gisements de plomb sulfuré qui ont fourni les plus nets et les plus curieux exemples d'altération superficielle et de remise en mouvement, par les eaux creusantes ; et l'on pourrait multiplier les exemples, prouvant combien les eaux infiltrées sont disposées à côtoyer les filons, injectés eux-mêmes dans les fissures du sol et agrandis ultérieurement en cavernes.

La relation des grottes avec les filons a été observée plus fréquemment que leur rapport direct avec les sources thermo-minérales, fait jusqu'à présent limité à quelques exemples (Aix-les-Bains; Pfæfers, Suisse ; Monsumano, Toscane ; Kraus-grotte de Gams, Styrie ; Proval de Piatigorsk, Caucase).

Lors de ma mission au Caucase occidental en 1903 pour le gouvernement russe, j'ai constaté près de Sotchi (littoral de la mer Noire) que la source sulfatée calcique et chlorurée sodique de *Matsesta* (X et **39**) prouve formellement le fait du creusement (ou tout au moins de l'utilisation) d'une grotte du calcaire par une source thermo-minérale ; cela facilitera singulièrement le captage actuellement en cours d'exécution. — L'origine première

des eaux de Matsesta n'est sans doute pas très lointaine (car elles augmentent après les grandes chutes de pluies régionales) ; elle doit être dans les infiltrations pluviales et neigeuses des formations jurassiques de la chaîne principale du Caucase à 20^{km} à 30^{km} au nord-est (1 800^{m} et 2200^{m} aux monts Jégoch et Tschoura).

En 1909, nous avons cherché à prouver que les sources des Eaux-Chaudes et des Eaux-Bonnes proviennent, au moins partiellement, du plateau d'Anouillas et du Pic de Ger : mais une expérience à la fluorescéine, exécutée dans des conditions défectueuses, n'a pas donné de résultats (**74**). Dans cet ordre d'idées, il reste beaucoup de recherches matérielles à faire.

En tout cas, j'estime qu'il y a lieu d'admettre que les sources thermominérales peuvent avoir, les unes une origine tout à fait profonde (hypothèse volcanique de M. Armand Gautier), les autres une origine extérieure (hypothèse de l'infiltration superficielle, développée par L. De Launay).

Acide carbonique et gaz irrespirable. — La mofette du creux de Souci, profond de 21^{m},50, au lac Pavin (Puy-de-Dôme), sous la lave du puy de Montchal (**8**), a des fluctuations expliquées par les variations de la pression atmosphérique. Les émanations d'acide carbonique ne sont d'ailleurs pas limitées (comme résidus de l'activité volcanique) aux *grottes du chien* des terrains éruptifs.

J'ai rencontré quelques exemples de *poches* d'acide carbonique, dans certains culs-de-sac de cavernes calcaires, même à grande distance de tout centre volcanique. Elles demeurent de vraies énigmes.

(A Roque-de-Corn (Lot), par exemple, le gaz était moins abondant, en automne 1895, qu'à la même époque de 1890 à 1891.)

Ailleurs, ce sont parfois des décompositions de matières organiques, végétales ou animales, entraînées et accumulées dans certains recoins des grottes, exceptionnellement bien clos, qui provoquent des dégagements non pas d'acide carbonique, mais plutôt de quelque autre gaz délétère, irrespirable pour l'homme et éteignant les bougies ; jusqu'ici, l'analyse de ces gaz n'a pas été faite ou n'a pas abouti. (Grotte des Fées, à Saint-Maurice (Valais, Suisse), M. Forel, en 1864, fond de certains katavothres du Péloponèse ; goules de l'Ardèche (?), etc.)

C'est de l'*hydrogène sulfuré* qui s'échappe de la source de Matsetsa (Transcaucasie) (v. ci-dessus). Ce gaz délétère émanait d'un ruisseau souterrain où j'ai failli être asphyxié. Depuis lors, des travaux exécutés par les soins de M. Yermoloff ont permis d'assainir la caverne et de préparer le captage.

Sources variables ou rémittentes. — J'ai pu expliquer le mécanisme des sources variables, *temporaires* ou *rémittentes*, qui ne jaillissent qu'après les grosses pluies ; elles sont à peu près toutes des *trop-pleins* de sources pérennes et voisines, situées plus bas (fig. 30 à 34).

De même, le lac intermittent de Zirknitz (Autriche) est le trop-plein de

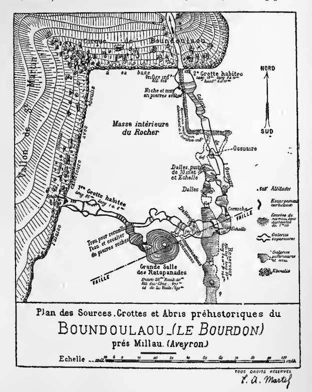


Fig. 31. — Plan d'une émergence à plusieurs étages de trop-pleins, sous un promontoire du Larzac (Boundoulaou, Aveyron).

rivières souterraines qui coulent sous son lit, plus ou moins abondamment selon la précipitation atmosphérique (II).

On a matériellement observé l'existence, la fréquence et la brusquerie de véritables crues souterraines dans les cours d'eau des cavernes.

Car les variations du régime météorologique se font sentir très rapidement, contrairement à ce que l'on a longtemps enseigné, sur les réservoirs des résurgences : c'est cela qui motive leurs oscillations, *modérées dans une forte mesure par l'action retardatrice des siphons* (voir p. 35), — et aussi les troubles (argiles boueuses) constatés parfois dans leurs eaux (Vaucluse, janvier 1895; Fontaine-l'Évêque, janvier 1895; Saint-Chély-du-Tarn, septembre 1900, etc.).

En particulier, il n'y a pas d'autre raison au régime en apparence si compliqué (8 à 80 m. c. sec. en moyenne ; extrêmes connus 4 m. c. 5 à 153 m. c.) de Vaucluse ; l'écoulement y a lieu par de longs et hauts canaux renflés au milieu, où de considérables variations de niveau se produisent sous la double influence : 1° du jeu irrégulier des précipitations atmosphériques et des infiltrations qui en résultent ; 2° des rétrécissements, siphonnements et éboulements intérieurs, agissant comme des vannes retardatrices et transformant ces canaux en *réservoirs temporaires étroits*. Ces variations, engendrant de grandes différences de pression hydrostatique, provoquent une mise en charge plus ou moins considérable des *veines* liquides ramifiées sous terre ; et la répercussion de cette pression variable sur le *dernier vase communicant* qui forme, dans une faille, l'émergence de Vaucluse, amène les écarts de niveau et de débit de la fontaine (**32**). (V. fig. 20, p. 39.)

De même pour la Touvre (Charente), j'ai pu constater par la comparaison de l'état différent des eaux souterraines des Fosses de la Braconne au printemps de 1892 et à la fin de l'été de 1900, que les oscillations de la hauteur d'eau provoquent celles du niveau de la source de ce nom (**115**). C'est une autre négation de la théorie des nappes.

Sources intermittentes. — J'ai vainement cherché (1907 et 1909) à pénétrer derrière celle de Fontestorbes (Ariège) (**53, 74**). Mais en 1908 j'ai fait connaître le remarquable phénomène d'oscillations hydrauliques (non signalées encore) du Trou de Poudak (Haute-Garonne) (**60** et **73**).

Il y a là tout un système de gouffres, canaux souterrains, pertes bifurquées, très curieusement disposées.

On ne saurait émettre que des hypothèses imprécises sur l'existence de siphons d'inégaux diamètres, de bassins à orifices superposés, de conduits à plusieurs étages, qui provoquent sans doute cette intermittence, plus singulière encore que celle de Fontestorbes.

C'est là surtout qu'un déblaiement serait opportun pour révéler le véritable mécanisme des oscillations constatées, et pour expliquer matériellement la théorie encore si obscure des fontaines intermittentes.

Dimensions inégales des orifices d'émergence. — Entre autres bizarreries morphologiques des cavernes, on s'était demandé pourquoi certaines sources

très puissantes sortent (comme Vaucluse) d'orifices étroits ou complètement immergés, tandis que d'autres, même voisines, jaillissent sous des porches de proportions colossales (Bournillon Guiers-Vif (fig. 33) la Balme, Isère; Grotte Sarrasine, Jura, etc.). C'est parce que les grottes aujourd'hui largement ouvertes, d'où sortent encore des ruisseaux accessibles à l'homme, ont été, pendant un temps, la dernière chambre-réservoir, fermée vers l'extérieur, d'un courant souterrain jadis beaucoup plus puissant; et que, par l'effet de la pression hydrostatique surtout, la cloison rocheuse qui la séparait jadis du dehors a fini par être emportée dans une sorte d'explosion hydraulique, qui a laissé béante la grande cavité actuelle (**123**).

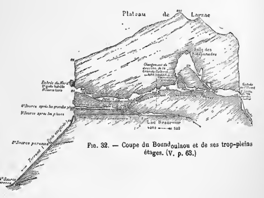


Fig. 32. — Coupe du Boundoulaou et de ses trop-pleins étages. (V. p. 63.)

J'ai pu pénétrer, en effet, soit par des trop-pleins à sec, soit par l'étroi canal même de sortie des eaux, dans des grottes à orifice extrêmement resserré, en arrière duquel j'ai presque toujours trouvé un vaste espace que les eaux de crue remplissent plus ou moins; dans ces cas, la *bonde* du réservoir souterrain n'a pas encore sauté.

Il est infiniment probable que, derrière les sources siphonnantes, où l'eau remonte de plus bas que son point d'émergence, la dernière caverne-réservoir n'a pas encore éclaté, parce que le mur séparatif final reste trop épais, faute d'approfondissement du thalweg extérieur voisin (fig. 34).

J'ai indiqué, pour Fontaine-l'Évêque (**68**, **69**), comment un travail très peu coûteux permettra de vérifier, et sans doute d'utiliser, ce dispositif.

Perforation des supports imperméables internes. — Descente des eaux. — On a vu (p. 45) que, dans les sous-sols calcaires, les zones marneuses intercalaires, en théorie imperméables, sont brisées ou interrompues beau-

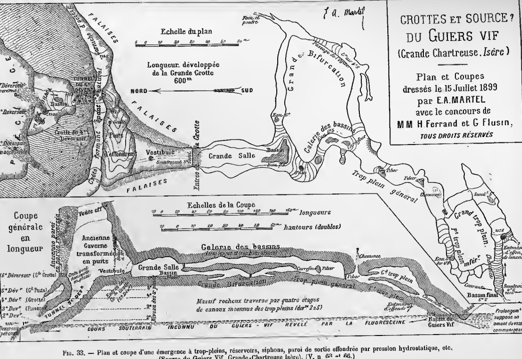


Fig. 33. — Plan et coupe d'une émergence à trop-pleins, réservoirs, siphons, paroi de sortie effondrée par pression hydrostatique, etc. (Source du Guiers Vif, Grande-Chartreuse Isère). (V. n 63 et 66.)

coup plus souvent qu'on ne le croit, au grand préjudice du filtrage naturel des eaux souterraines.

La constatation matérielle de ce fait a été particulièrement remarquable à la *grotte de Pène-Blanque* (Haute-Garonne), (**63** et **73**), dont la coupe montre comment une ancienne rivière souterraine, alimentée par des crevasses ou des abîmes supérieurs, a été soutirée en profondeur, capturée par la pesanteur et la fissuration; vers le milieu, une succession de grandes cassures indique nettement qu'ici l'intérieur de la montagne se trouvait haché de verticales *diaclases*, que le trajet horizontal des eaux souterraines

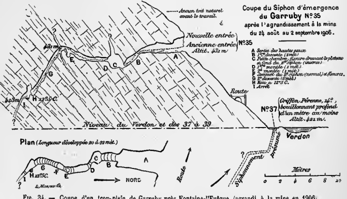


Fig. 34. — Coupe d'un trop-plein de Garruby près Fontaine-l'Evêque (agrandi à la mine en 1906), montrant une paroi de roches qui a résisté à la pression hydrostatique souterraine.

vint recouper par leur travers; ces fissures avaient préparé non seulement dans les masses rocheuses dures, mais aussi à travers les marnes ayant supporté le courant pendant quelque temps, une série de points faibles, une réelle zone d'appel; leur agrandissement en puits et fentes étroites, constaté jusqu'à 100 mètres de profondeur, a causé la fuite de l'eau vers des étages inférieurs.

On rencontre là, sous terre, un point de dislocation tectonique intense, qui rend lumineusement compte, par la plus persuasive des leçons de choses, de quelle manière les eaux souterraines peuvent gagner de plus bas niveaux, dans l'intérieur des calcaires, et de quelle façon se sont creusées les grottes à plusieurs étages.

La plupart du temps, les cassures des calcaires, inférieurs ou supérieurs

aux zones marneuses, ont ainsi intéressé celles-ci au point de les pourfendre sur toute leur épaisseur.

Dans les grands avens des Causses, des Alpes, des Pyrénées, etc. (profonds de 100 mètres à 500 mètres), le creusement des vallées soutirantes, en abaissant le niveau de base général, et corrélativement celui des eaux souterraines, a facilité la perforation successive des diverses zones marneuses (oxfordienne, callovienne) théoriquement imperméables, intercalées dans les calcaires compacts ou les dolomies. Ces perforations de *planchers* marneux ont été constatées en divers pays et ont achevé de nous éclairer sur les étapes du voyage des eaux souterraines entre les points d'absorption et les résurgences. De toutes ces constatations si probantes les partisans des nappes d'eau ne tiennent pas compte, *faute d'avoir vu*.

Pertes et résurgence submergées et sous-marines. Volcanisme. — Les pertes d'eaux se rencontrent aussi dans le fond des lacs du Jura, des Alpes, etc.

De même, les émergences ont été reconnues dès l'antiquité, non seulement au creux des lacs, mais encore au large de bien des côtes, sous forme de sources sous-marines, dont l'origine terrestre n'est pas contestable. Mais il reste bien des vérifications à faire. Ainsi j'ai constaté en 1906 et 1907 que la fameuse source sous-marine de Port-Miou (Bouches-du-Rhône) n'existe pas, ou bien est très variable (**59**, **71**).

Rien ne permet de nier que, dans le creux des mers, même par de très grandes profondeurs, des pertes aussi ne fonctionnent pas : l'océanographie future nous les révélera.

En effet, les célèbres pertes des *moulins de la mer* d'Argostoli conduisent à croire que certains abîmes, aujourd'hui à sec, ont constitué jadis des points d'engouffrements de mers anciennes ; et que ce phénomène doit persister, à notre insu quant à présent, dans le fond des mers actuelles.

On a même le droit de se demander si ces pertes sous-marines ne conduisent pas des eaux salées vers le magna fluide, et n'y provoquent pas par réactions chimiques les mouvements ascensionnels des matières éruptives.

Cela remettrait en question le rôle des infiltrations aqueuses extérieures sur les manifestations éruptives ; il ne paraît pas négligeable en matière de volcanisme (**52**).

Importance de l'érosion torrentielle mécanique. — Ma longue et extensive enquête dans les régions calcaires, à la recherche des points d'absorption, cavernes et résurgences, m'a conduit à l'étude détaillée et comparée des effets généraux de la dénudation par l'eau : j'ai abouti ainsi à une réelle synthèse des résultats mécaniques de l'*érosion torrentielle* en mettant en parallèle : 1° les manifestations de son activité souterraine ; 2° les témoins anciens qu'elle a laissés sur de hauts plateaux desséchés ; et 3° les produits de son travail actuel au fond des thalwegs et même en pleins courants dans

le lit des rivières torrentielles (**47**, **49**, **68**) ; au passage, j'ai eu à modifier les idées en cours sur le *profil en long* des cours d'eau ; l'examen des accidents curieux connus sous le nom de *lapiaz* m'a fourni aussi des conclusions nouvelles et précises sur leur genèse ; enfin, ces mêmes observations dans les Alpes, les Pyrénées, le Caucase m'ont obligé à de sérieuses critiques contre les théories actuellement en vigueur sur les *phénomènes glaciaires* et le *creusement des vallées*.

Inégalité de l'érosion torrentielle et des profils en long. — En matière d'érosion par l'eau courante, on savait que l'intensité de l'affouillement dépend, à la fois et solidairement, de la vitesse d'écoulement et de la nature des roches attaquées ; on pensait que l'inégalité de résistance des divers terrains d'un thalweg peut faire obstacle à l'établissement régulier d'un profil d'équilibre continu ; et on admettait que les schistes tendres, par exemple, sont affouillés plus rapidement que les roches stratifiées des calcaires.

L'étude des rivières torrentielles, effectuée, non pas par à peu près, depuis les rives ou berges, mais avec précision dans leur lit même, au milieu de l'eau et des manifestations variées qui entravent son travail, permet de bien confirmer la première des trois propositions ci-dessus, de généraliser considérablement la seconde et de tenir la troisième pour tout à fait inexacte.

Cela résulte de mes recherches *au fond* des *clues* ou cañons des Alpes-Maritimes, du Var, des Basses-Alpes, des Basses-Pyrénées (Pays basque). Le profil en long des clues du Var et du Cians est de 2 1/2 à 3 fois plus accentué dans les schistes que dans les calcaires, contrairement à ce que l'on enseigne encore.

Cela tient d'abord à ce que les calcaires, *fissurés en grand*, se débitent en volumineuses masses, dont les débris accroissent d'autant les chocs de l'eau courante, et ensuite à ce que le calcaire est, bien plus que le schiste, sensible à l'attaque chimique, ou corrosion de l'eau toujours un peu chargée d'acide carbonique. La rapidité d'évolution d'un lit calcaire est donc beaucoup plus considérable qu'on ne l'a cru jusqu'ici (n° **49**).

Il s'ensuit : 1° que les schistes, même tendres, peuvent résister à l'érosion plus longtemps que les calcaires durs et fissurés ; 2° que les cours d'eau y acquièrent un profil en long bien moins accidenté, même s'il est plus rapide; 3° que les bosses, imposées à la courbe idéale d'équilibre (en cours de régularisation) des cours d'eau par la diversité des terrains, sont plus fortes et plus persistantes encore qu'on ne le pense, et constituent une règle plutôt qu'une exception ; 4° et qu'en conséquence, l'approfondissement, en amont des bosses surtout, se poursuit toujours très activement, ce qui empêche, accessoirement et absolument, de croire à l'arrêt actuel du creusement des vallées.

Il importerait de tenir compte de ces particularités, pour la pratique et

la technique des barrages, digues, quais, piles de pont, batardeaux, fondations d'usines hydrauliques, écluses, etc., et autres ouvrages exposés à l'action érosive des cours d'eau. J'ai cité, en effet, nombre de points où la fissilité et l'inconsistance de la pierre ont permis de constater matériellement les effets rapides de l'érosion au cours même de quelques années (**49**, **166**).

Il conviendrait donc d'établir des stations d'observations photographiques

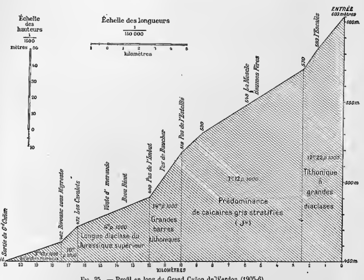


Fig. 35. — Profil en long du Grand Cañon du Verdon (1905-6).

et autres pour les altérations érosives des cours d'eau. On recueillerait alors de précieuses indications pour la meilleure utilisation de la *houille blanche* et pour la sauvegarde de certains travaux publics.

J'ai fait ressortir (**186**) la conséquence de tout ceci en déclarant, à propos du profil en long du grand cañon du Verdon, que la notion de la régularisation graduelle de la pente des cours d'eau vers une réelle courbe d'équilibre est, d'une manière absolue, *fausse*. On ne peut pas dire que cette courbe se relève très lentement et très progressivement vers l'amont.

La diversité des terrains et des facteurs hydrauliques et topographiques s'opposent à l'uniformisation de cette courbe *idéale*. Dans les régions montagneuses et même dans les parties moyennes, subsistent toujours les ressauts exclusifs d'une courbe géométrique. Les travaux de la section spéciale du profil en long des cours d'eau dans le Comité d'études scientifiques du ministère de l'Agriculture (avec le concours du Service du nivellement général de la France, de MM. Ch. Lallemand, Tavernier, de la Brosse, de Margerie, etc.), ont déjà confirmé ce qui précède, notamment pour la Haute-Durance de Briançon à Embrun, par exemple. De même pour le Nil.

Origine torrentielle des roches ruiniformes. — La morphologie comparée des phénomènes d'érosion, tant souterrains qu'extérieurs, m'a imposé les opinions suivantes :

Les roches ruiniformes (perforées, pédonculaires, columnaires, etc.), si fréquentes dans les calcaires, sont attribuées par la plupart des géologues à la seule action météorique (plus puissante jadis que maintenant) des vents et des pluies.

J'ai toujours soutenu au contraire, et dès 1888, que de vrais *courants torrentiels* ont été la principale cause de ces accidents morphologiques (Montpellier-le-Vieux, Aveyron) (v. **78**). Cette opinion (qu'on a traitée de *fantaisiste*, lorsqu'on croyait encore que, dès le milieu de l'ère tertiaire, le creusement des cañons des causses cévénols, par exemple, était assez avancé pour que la dolomie de ces plateaux fût, dès lors *et pour toujours, soustraite aux effets de l'affouillement de l'eau torrentielle courante*) est aujourd'hui définitivement établie par les faits suivants :

1° Il est bien prouvé que le creusement des vallées *actuelles* n'est ni achevé, ni surtout aussi ancien qu'on le prétendait (v. **29**, **44**, **47**, **48**, **49**, **51**, **54**, **61**, **71**, **86**) ;

2° Les anciens lits de puissants courants tertiaires (même miocènes) ont été depuis peu d'années reconnus très haut sur les surfaces de tous les plateaux calcaires (**47**, **68**, **83**, **103**).

3° Au fond du grand cañon du Verdon j'ai trouvé, en 1905, la preuve matérielle du *processus* employé par l'eau d'un torrent (actuel et très *déchu*) pour tarauder, dans une marmite de géants, une roche pédonculaire toute pareille à celles des villes de rochers. C'est le produit de la formation tourbillonnaire si bien commentée par MM. J. Vallot et J. Brunhes (fig. 36).

4° De telles marmites (sans pédoncule central), ébréchées ou déjà percées, abondent aussi dans le Rhône (vers Bellegarde), le Verdon, le Fier, la Valserine, la Cèze, l'Ardèche, les gaves pyrénéens ;

5° Les arcades ou ponts naturels s'y rencontrent comme dans les *villes de rochers* et ont la même origine ;

6° En Belgique, près de Chaleux (Furfooz), dans un bras souterrain de la Lesse, avec MM. Rahir et Van den Broeck nous avons trouvé une roche pédonculaire dans le lit du ruisseau : la corrosion chimique a agi aussi,

mais, *dans une caverne, la pluie et le vent ne sauraient entrer en ligne.*
Par conséquent, il est permis d'affirmer que la croyance, absolument erronée, au rôle prédominant des agents atmosphériques était due à l'inexactitude et à l'insuffisance des observations dans les phénomènes en question ; le rôle réel de l'*érosion torrentielle*, autrefois bien plus puissante

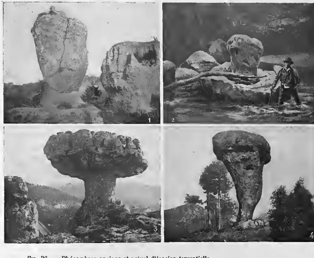


FIG. 36. — Phénomènes anciens et actuel d'érosion torrentielle.
1. — Montpellier-le-Vieux. L'amphore (300m au-dessus de la Dourbie)
2. — Marmite à pédoncule dans le lit du Verdon (à l'étiage).
3. — Table du Diable, au sommet des falaises de Saint-Mihiel (Meuse).
4. — Cité enchantée de Cuenca (Espagne), découverte en 1907, par M. Font y Sague.

que maintenant, est irréfutablement établi par les faits matériellement constatés, en tous pays, parmi les lapiaz chaos, et cañons calcaires.

Il résulte même de mes observations en Bohême (1898) et à Fontainebleau (1904-1909), que cette règle est applicable aussi aux grès parisiens (**56**, **57**, **76**) et aux *quadersandstein* de la Suisse Saxonne, de Werkelsdorf et d'Adersbach (*La Nature*, nos 1373 et 1375).

La fissuration naturelle de ces grès les a, en effet, prédisposés tout spécialement à l'action des érosions hydrologiques tant superficielles que

souterraines. Et j'ai relevé maintes preuves de ces érosions.

Ce n'est donc pas le travail des eaux de pluie, des simples ruissellements locaux qui doit expliquer la capricieuse morphologie des grès de Fontainebleau. Il faut revenir à l'hypothèse de Belgrand sur l'action des courants violents ; dans l'aire des grès de Fontainebleau, si étrangement burinée par d'indiscutables érosions très puissantes (bras de la Loire pliocène probablement). On conteste cette manière de voir : mais, là encore, c'est faute d'avoir *vu* les faits comparatifs qui lui servent de base solide.

Dénudation des roches dures. — Les érosions torrentielles contribuent aussi à expliquer la dénudation des régions à roches dures siliceuses.

On se figure en effet assez aisément comment la pluie et la *déflation*, ou action du vent violent (abrasion éolienne), réussit à dégrader des pierres relativement tendres ou peu cohérentes, comme les grès d'Oupliz-Tsiké, en Transcaucasie, du Sahara, du Transvaal, comme certains granits tendres d'Espagne, Portugal, Limousin, etc., comme les conglomérats où se sont dressées les *Cheminées des Fées*, etc. Mais on conçoit moins facilement la disparition à peu près totale, le découpage en minces aiguilles isolées, de pierres siliceuses volcaniques, réfractaires, par leur structure, à la désagrégation météorique et, par leur composition chimique, à la morsure de la corrosion, par exemple les porphyres rouges de l'Estérel ; mais ici une multiplicité de fissures verticales divisent la roche en d'irréguliers polyèdres (fentes de retrait produites par le refroidissement des coulées éruptives). Ainsi cette roche, une des plus dures que l'on connaisse, offre dans ses craquelures naturelles une quantité de points d'attaque, favorables pour l'agent destructeur par excellence, l'eau. Comme torrent, autant que comme pluie, celle-ci a été le réel dégradateur, démolisseur, de l'Estérel, grâce au réseau des cassures entre-croisées ; — de là proviennent, au pied des escarpements, les immenses talus ébouleux des *clapiers* ; le ruissellement entraîne leurs menus cailloux au fond des thalwegs, où les torrents finissent par les réduire en sable (V. *la Nature*, n°1842, 12 septembre 1908).

Formation de la perte et du cañon du Rhône. — Fissuration et érosion combinées donnent encore la clef du célèbre phénomène de Bellegarde. En réalité, la fameuse et classique perte du Rhône n'est pas véritablement souterraine. Elle présente une complète analogie d'origine et de formation avec certaines rivières intérieures dans les diaclases du calcaire. Dans la profondeur, les strates compactes n'ont pas été partout emportées ; par endroits, il en subsiste des fragments, conservant d'une paroi à l'autre la continuité de la dalle résistante ; ces *témoins en place*, véritables ponts, ignorés parce qu'ils sont submergés, ne peuvent être que sporadiques, comme ceux reconnus dans les profils de la rivière souterraine de Padirac ; en somme ce n'est ni une perte totale, ni un siphon proprement dit. J'ai précisé en 1904, comment ce que le Rhône perd en largeur au pont de Lucey il le regagne en profondeur, comme l'avait

déjà entrevu de Saussure : *d'horizontal son cours devient vertical.* Cela est produit par l'engouffrement subit du fleuve dans une fissure verticale du calcaire, dans une diaclase ouverte précisément dans l'axe du courant (Voir n° **126**, et *la Nature*, n° 1878, avril 1909).

Cela est si vrai, qu'en 1909 on a trouvé, au point précis d'engouffrement, une profondeur de 60 mètres qui a confirmé, de surprenante manière, mon explication ci-dessus (fig. 37).

Il en résulte que la *perte du Rhône* deviendra une cluse, ou *klamme* proprement dite, seulement le jour où le lit du fleuve se sera suffisamment approfondi en aval, pour abaisser le plan d'eau dans la fissure, et pour créer une vraie chute sous le pont de Lucey, disposition qui se trouve déjà réalisée

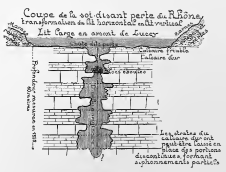


Fig. 37. — Coupe probable de la perte du Rhône. (Une mesure de 1909 a donné 60 mètres de profondeur).

par la Linth (canton de Glaris, Suisse) à la Pantenbrücke. Plus loin, dans le cañon du Rhône, l'étroit du Malpertus, où le fleuve a moins de 2 mètres de large, présente un dispositif analogue. — En réalité, le Rhône, dans sa perte et son cañon, est beaucoup plus profond et moins achevé qu'on ne l'a cru jusqu'à présent. De la frontière suisse à Pyrimont, son profil en long est très irrégulier aussi (V. p. 71) (1).

Enfin, il est très nettement évident que, jadis, le Rhône a coulé 60 à 80 mètres plus haut, sur le plateau (couvert de ses alluvions) qui porte Bellegarde : ses anciens lits et terrasses sont visibles jusqu'à Genève.

Origine des lapiaz. — Leurs absorptions. — Quant aux *lapiaz* (rascles, karren, schratten, etc.), des calcaires, que l'on rencontre aussi dans les

(1) Toutes ces vues ont été confirmées par une étude (inédite) que j'ai faite à fin octobre 1910.

schistes, le gypse, le grès et le granite (chérats du mont Pilat), on les avait généralement attribués à l'action chimique ou corrosion des pluies et neiges, chargées d'acide carbonique (V. Heim, Tietze, Neumayr, Becker, Ratzel, Van den Broeck, Bougert, Chaix, Eckert, Duparc, etc).

Sans nier l'importance du facteur chimique, j'ai pensé, après avoir, depuis 1882, examiné les principaux lapiaz des Alpes et de la France, et découvert les trois nouveaux de l'Oucane de Chabrières (Hautes-Alpes, **40, 107**), des Bracas (Basses-Pyrénées, **61, 73**) et de l'Arabika (Caucase, X, **37**), que le rôle *mécanique* de l'eau *courante*, même contemporaine, y est très influent.

En effet, il en existe de véritables dans des plaines, plateaux et fonds de vallées de faible altitude, pont des Oules près Bellegarde (Ain), sortie des gorges du Fier (Haute-Savoie), gorges de l'Ardèche près Saint-Marcel (Ardèche), cataractes du Sautadet près Bagnols (Gard), Bétharram et Orthez (Basses-Pyrénées), etc. Ils montrent clairement comment la Valserine, le Fier, l'Ardèche, la Cèze, le gave de Pau sont, de nos jours encore, activement occupés à creuser *mécaniquement*, dans les calcaires, les détails de ciselure des karren alpestres, avec des *gouffres* plus ou moins remplis d'eau, atteignant jusqu'à 30 mètres et 40 mètres de profondeur. Enfin les rascles d'*érosion* abondent dans toutes les rivières souterraines.

On ne peut donc pas soutenir que la force *vive* et le frottement des eaux courantes et des matériaux qu'elles entraînent soient moins destructifs que l'usure lente produite par la morsure des pluies et des ruissellements acidulés. Il faut même aller plus loin et déclarer que les grands chaos rocheux comme Mourèze (Hérault), le bois de Païolive (Ardèche), de Montpellier-le-Vieux (Aveyron), El Torcal la Cité Enchantée de Cuenca (Espagne), sont aussi d'immenses lapiaz exagérément développés.

Les calcaires ont été *rasclés* de 30 mètres à 100 mètres de profondeur par les rivières, jadis beaucoup plus puissantes, de la Dourbie (Mourèze), du Chassezac (Païolive) et par le grand courant tertiaire qui a jadis traversé le Causse Noir, etc.

Similairement, j'ai constaté que les classiques *lapiaz de sommets* des Alpes et des Pyrénées représentent *topographiquement des portions nettement dessinées d'anciens thalwegs desséchés*.

Les mouvements tectoniques, les plissements et les charriages des Préalpes et des Pyrénées calcaires, permettent de comprendre comment ces tronçons de thalwegs se trouvent maintenant suspendus sur leur socle à plusieurs centaines de mètres en l'air.

Enfin, et *sans exception aucune*, j'ai trouvé, parmi tous les lapiaz observés, ces puits naturels et points d'absorption des eaux superficielles, qui ont progressivement, et dans toutes les formations calcaires, substitué une circulation souterraine au primitif ruissellement extérieur.

Toutes les villes de rochers et les *lapiaz* calcaires, même ceux aujourd'hui haut perchés et desséchés au-dessus des vallées, possèdent des gouffres ou abîmes profonds qui ont capturé de très forts courants. J'ai fait cette

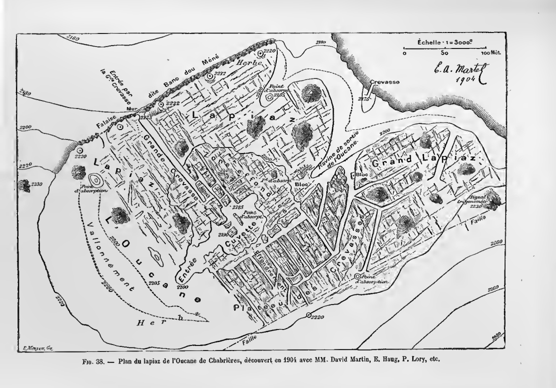


Fig. 38. — Plan du lapiaz de l'Oucane de Chabrières, découvert en 1904 avec MM. David Martin, E. Haug, P. Lory, etc.



(Basses Alpes).

constatation à travers toute l'Europe, jusqu'au Caucase occidental (**37**) et à l'Andalousie (au *Torcal de Abdalazis*, près Antequera) (**61**). L'ancienne et abondante circulation torrentielle y est irréfutablement démontrée.

Cette relation, *absolue et générale*, entre les abîmes ou points d'absorption du calcaire et les lapiaz est donc une véritable loi géologique et hydrologique, qui n'avait pas encore été formulée ; en tous cas, elle justifie, à elle seule, ma nouvelle explication de la formation *originaire* sinon de tous, du moins d'une grande partie des lapiaz ou karren, tant de rivières que de sommets ; sous cette réserve, d'ailleurs, *qu'actuellement* ce n'est plus guère que l'action *chimique* des eaux météoriques (pluies et neiges acidulées) qui trouve à s'exercer, avec un *facies* différent et sur une échelle bien plus faible, parmi les lapiaz de sommets (**33**, **37**, **40**, **61**).


Fig. 40. — Abîme bouché par la neige au lapiaz de l'Arabika (Caucase) (p. 79 et 83).

Critique des théories glaciaires. — Dans les cavernes et les abîmes, comme dans mes observations sur les vallées et les torrents, j'ai trouvé de multiples arguments, donnant raison à ceux qui considèrent (Carez, Vallot, Stanislas Meunier, Guebhard, Depéret, etc.) que l'hypothèse du creusement des vallées par la glace même apparaît de plus en plus comme mal fondée, et que MM. Penck, Brückner, Obermaier et leur école allemande ont considérablement exagéré la force érosive des glaciers.

Ainsi, pour le premier tunnel de la grotte de Lombrive (Ariège), on avait voulu voir les traces du passage d'un bras du glacier de l'Ariège, dans les petites dépressions spatulées en cupules, prises pour des coups de gouge de la glace en mouvement ; or elles ne sont pas autre chose que des *empreintes de corrosion chimique* (**127**).

On ignorait que, dans toutes les glacières naturelles ou puits à neiges, la glace ou le névé souterrain *n'adhère jamais aux parois de la cavité*, qui les a recueillis. Toujours ils en sont séparés par un vide de fusion *de plu-*

sieurs centimètres de largeur. Partout j'ai constaté (Jura, Alpes, Pyrénées, Karst, Tatras, Caucase, etc.) que, dans ces glacières, c'est la neige d'hiver qui s'accumule, et qu'en été la chaleur propre de la roche la fait fondre, parfois jusqu'à sa disparition complète à la fin de l'automne (**7, 18, 19, 37, 54, 73, 104, 105, 106, 107, 111, 123, 146**). C'est le contraire de ce que l'on prétendait jadis. Il en résulte formellement que, sous terre, ce ne peut pas être la glace qui use la roche, mais que, bien à l'opposé, la roche fait fondre la glace par l'effet naturel de la géothermique.

Aux cavernes de l'Ariège spécialement, j'ai trouvé que les apports granitiques (blocs et sables) *uniquement torrentiels* de Niaux, Lombrive, Sabart, Bédeillac, y ont été introduits jadis par des abîmes et des points d'absorption fort anciens (**127**). C'est la preuve absolue de l'origine *fluviale* et

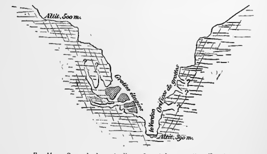


FIG. 41. — Crans de descente d'un cañon et de ses grottes affluentes (Baudinard, Var).

nullement glaciaire de ces dépôts, et même des terrasses extérieures qui correspondent à quatre niveaux. Chaque stade d'approfondissement et de la vallée et de la caverne (passage d'une terrasse à une autre) est visiblement explicable par la rupture d'une barre calcaire, beaucoup mieux que par une grande débâcle glaciaire, forcément de peu de durée.

Chaque fois qu'une cluse s'ouvrait dans l'épaisseur d'une muraille calcaire, il s'établissait une dénivellation brusque constituant ce que j'ai nommé des *crans de descente* (**100** et **103**); le courant abandonnait son précédent lit (qui devenait terrasse émergée) pour tendre de plus en plus vers un profil irrégulier d'équilibre; l'augmentation de vitesse d'écoulement, résultant de l'accroissement de pente du bief en amont de la barre crevée, explique le rétrécissement progressif des lits, ainsi successivement emboîtés, et occupés d'ailleurs par des eaux de moins en moins abondantes, par suite de l'assèchement croissant du climat.

De même la vallée de la Durance entre Briançon et l'Argentière (**103**) est, comme les cavernes de l'Ariège, un formel argument contre l'exagération des théories glaciaires. Celles-ci ont dépassé le but; il faut qu'elles fassent *machine en arrière*. M. Garrigou était certainement dans le vrai, dès 1867, en disant que les terrasses d'alluvions quaternaires anciennes et d'alluvions récentes de l'Ariège indiquent un changement succcssif dans le régime des cours d'eau et un abaissement bien marqué de leur niveau (1).

Et il n'est plus discutable que, pour le transport et le polissage des graviers et blocs granitiques des grottes ariégeoises, pas plus que pour le creusement des *cluses* de montagnes, on ne saurait invoquer en aucune manière l'action directe immédiate du glacier; elle ne peut être que complètement indirecte, par le fait des eaux torrentielles provenant de la fusion des glaciers situés au voisinage ou en amont.

Les cassures préexistantes et l'érosion mécanique en sont les principaux artisans.

Les *lits* de rivières torrentielles dans les *cañons* de Provence et du Pays Basque sont tellement remplis de marmites de géants, blocs de transport, stries et polissage d'érosion pure et *actuelle*, que leur aspect impose une sérieuse révision des conclusions tirées jusqu'ici des phénomènes soi-disant glaciaires; en bien des cas on a certainement invoqué, comme témoignages d'anciennes glaciations de simples effets d'eaux torrentielles (**54, 103**).

Il faut, notamment, transformer en *crans de descente* des torrents la plupart des terrasses considérées jusqu'ici comme glaciaires; car elles subsistent d'un bout à l'autre des vallées profondément encaissées, même dans les régions voisines de la mer, où l'existence d'anciens glaciers n'est pas présumable. Ces crans se trouvent au droit de tous les bancs calcaires, où des *cluses* ont racheté des ruptures de pente pour tendre vers le profil d'équilibre. J'insiste particulièrement sur ce point.

Un certain nombre de vocables nouveaux, relatifs à ce sujet, ont vraiment introduit dans la science géologique bien des complications inutiles; une simplification de ces nomenclatures est obligatoire, le glacier n'étant plus qu'un *intermède accidentel*, qui ajoute ses effets locaux et passagers (moraines, blocs erratiques, boues, stries, polissages surtout) à ceux de l'érosion normale et continue.

L'idée qu'a eue (dès 1900) David Martin, de considérer les cluses des Alpes comme creusées non par la glace, mais par des *torrents sous-glaciaires* engagés dans une fissure, est admirablement juste et féconde; on en trouve la preuve aux *Klamme* qui précèdent les terminus actuels des glaciers de Grindelwald, Gorner, etc. Plusieurs éminents géologues ont eu raison de se rallier à cette notion, absolument prouvée par les faits.

La circulation intra-glaciaire des eaux dans les réseaux de crevasses a même été prouvée par les ruptures de poches d'eau : Catastrophe de Saint-Gervais,

(1) *Bull. Soc. anthropologie*, t. II, p. 2e s., février-avril 1867.

Glacier du Rhône, — Jostedal (Norvège). (V. la *Nature*, n° 1138, 23 mars 1895.)

La distinction établie, et malheureusement devenue classique, entre les vallées à profil en V comme érosives, et en U comme glaciaires, est *tout à fait spécieuse : le profil transversal dépend de la nature de la roche (de la lithologie) et non du mode de creusement* (**47, 68, 103, 186**). Et il y a toutes sortes d'intermédiaires, défiant les classifications, entre des vallées en U *uniquement torrentielles* et des vallées en V, *ayant contenu des glaciers.*

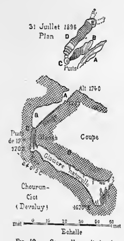


Fig. 42. — Coupe d'un puits à neige en Dévoluy (p. 83).

Pour avoir appliqué cette *fausse théorie* à la vallée de la Kander, et pour avoir considéré son remplissage comme morainique, on a estimé à moitié de son importance l'épaisseur des dépôts torrentiels (fluvio-glaciaires si l'on veut) qui l'ont colmatée. Et on s'est jeté tête baissée dans la catastrophe du tunnel du Lötschberg, débouchant le 24 juillet 1908 parmi des remplissages meubles fluents très aquifères (qui ont drainé le torrent vers la galerie), au lieu de demeurer dans la roche compacte !

Cet accident devrait être bien médité par les géologues, qui n'admettent pas encore les rectifications que j'oppose à certains enseignements doctrinaires actuels : il devrait achever de les persuader que les théories *ex cathedrâ* ne sauraient prévaloir contre l'observation rationnelle des manifestations naturelles elles-mêmes, et surtout contre la synthèse si fructueuse de leurs éléments comparables !

Il ne faut pas, comme trop de professeurs germaniques, expliquer les faits par la théorie préconçue, mais au contraire, selon la méthode française, faire jaillir d'un faisceau de faits bien liés entre eux les claires hypothèses qui conduisent vers la vraie lumière ! Il est prouvé que les cañons affirment la prééminence de la *cassure préexistante*, comme amorce originaire de tout creusement quel qu'il soit, dont la cassure est le *facteur passif* tandis que l'érosion en est le *facteur actif.*

Et la double conception de la *continuité* et de la *décadence* progressive du phénomène de l'érosion torrentielle, réduisant la glaciation à un épisode auteur d'effets particuliers, simplifie en même temps qu'elle explique bien des faits qu'on a compliqués comme à plaisir.

Il y a, dans tout cela, des coordinations toutes naturelles, — elles abou-

tissent automatiquement à des vues synthétiques, imprévues peut-être, mais formelles et singulièrement éclaircissantes et qui s'imposeront tôt ou tard. — C'est du moins ce qui me paraît ressortir de la technique d'observations *matérielles* (et généralement peu confortables) que je n'ai pas cessé d'appliquer.

D. — Physique générale.

Météorologie souterraine. — Température des cavernes et des sources. — Glacières naturelles. — J'ai montré qu'il était faux de considérer, au moins dans les terrains fissurés, que la température des cavernes et des sources est constante et égale à la température moyenne annuelle de la localité (**11, 14, 20, 72, 125**).

Les oscillations atmosphériques thermiques s'y font sentir, atténuées assurément, mais encore importantes jusqu'à une notable profondeur.

Dès 1894 j'ai démontré que, contrairement aux opinions reçues et enseignées, la météorologie des cavernes est gouvernée par les principes suivants :

1° La température de l'air n'y est pas constante ;

2° Elle n'est pas uniforme dans les mêmes parties d'une cavité ;

3° La température de l'eau est sujette à des variations et dissemblances, tout comme celle de l'air ;

4° La température de l'eau et celle de l'air y sont souvent discordantes.

Parmi les causes de ces anomalies, j'indiquais tout d'abord les suivantes :

1° La *fissuration* des terrains, qui facilite l'introduction de l'air extérieur, au même titre que celle des eaux d'infiltration ;

2° La *forme* des cavités ;

3° La *densité* de l'air froid, qui l'attire et l'emmagasine dans les profondeurs.

En effet, les rétrécissements et les dénivellations provoquent des appels et courants d'air, qui peuvent troubler l'équilibre de température ; les abîmes à double orifice et en forme de sablier (deux entonnoirs superposés par leur pointe) favorisent la chute et l'emprisonnement de la neige et de l'air froid en hiver, entravent son remplacement par l'air chaud, et sont la cause principale de formation des glacières naturelles (fig. 42).

4° *L'influence de l'eau*, qui peut agir de deux manières différentes, soit en refroidissant l'air par un effet d'évaporation, quand elle suinte lentement, soit en y apportant toutes les variations de l'air extérieur, en y pénétrant sous forme de rivières venant du dehors, froides en hiver et la nuit, chaudes en été et le jour.

Il est permis de dire maintenant que la météorologie des cavernes a fourni à la géologie quatre notions nouvelles :

A. — La première, c'est que la température de l'air n'y a pas du tout la

constance qu'on lui prêtait jadis, et que diverses circonstances, généralement d'ordre topographique, arrivent à la faire varier de plusieurs degrés, non seulement suivant les saisons, mais encore d'un point à l'autre d'une même caverne.

B. — La seconde, c'est qu'il en est de même pour les eaux des cavernes, et que par suite les *résurgences* (sources des calcaires) sont fort loin de présenter toujours une température égale à la moyenne annuelle de celle du lieu où elles émergent.

C. — La troisième, c'est que la formation des *glacières naturelles*, objet de si longues controverses et de si nombreuses théories, a pour cause principale l'action du froid hivernal, et pour causes accessoires par ordre d'importance, les quatre suivantes : 1° forme de la cavité; 2° libre accès du froid ou de la neige d'hiver; 3° altitude; 4° refroidissement par évaporation due aux courants d'air (**7, 111, 123**).

D. — La quatrième, enfin, c'est que les principes de la géothermique ne s'appliquent pas aux gouffres et cavernes, à cause de la facile pénétration de l'air au fond des plus creux abîmes naturels que l'on ait explorés jusqu'ici : et dans les abîmes de 200 à 300 mètres de profondeur, on n'a point trouvé que la température augmentât, au fur et à mesure de la descente, comme dans les mines.

En effet, grâce à la fissuration, l'air extérieur accède bien plus aisément dans les cavernes naturelles que dans les galeries artificielles.

Le percement du Simplon a achevé d'établir en outre, que, même à une grande profondeur, le calcaire reste une *roche froide*, parce que ses fissures y laissent descendre librement les eaux très fraîches infiltrées dans la haute montagne; cela institue, entre ces apports froids et la chaleur interne, un conflit qui, pour le Simplon, a communiqué aux eaux du tunnel, et même à la roche, une température de 11 à 19°, intermédiaire entre les 3° et 5° de la zone subaérienne d'absorption et les 35° à 38° que voudrait la géothermique.

On sait que ce tunnel a provoqué la vidange de canaux réservoirs plus ou moins vastes, qui alimentaient auparavant les sources de Nembro, débitant 100 litres par seconde; les eaux froides, contrairement à ce qu'on avait d'abord pensé, ne pouvaient pas diminuer de volume, ni par conséquent se réchauffer; alimentées par des apports extérieurs et élevés, constants sinon réguliers, elles devaient subir (après vidange des réservoirs percés), plutôt un abaissement qu'un relèvement de la température. En fait, c'est bien ce qui est survenu. Quant aux différences de température et de dureté observées (par M. Schardt) dans les diverses venues d'eau du tunnel du Simplon, elles proviennent simplement des accidents de leur circulation, qui rendent prépondérante tantôt l'influence des apports froids, tantôt celle de la chaleur profonde, et qui les mettent en contact avec des lentilles de gypse, le tout selon les capricieux dispositifs de la fissuration souterraine.

Par suite de la rapide descente des eaux de surface, les incidents du Simplon corroborent donc, de la plus probante manière, tout ce que j'avais précédemment déduit des sources froides des Alpes françaises et que Lorenz

avait déjà noté pour les îles de Vrana (île de Cherso, Dalmatie) et des sources du golfe de Quarnero; il est désormais *prouvé, sans discussion possible*, que l'action réfrigérante des infiltrations des hautes altitudes s'exerce, à travers les roches calcaires, non seulement jusqu'au niveau des résurgences dans les vallées basses, mais, encore plus profondément que ce niveau (II, III, VIII, IX, X, **11**, **15**, **67**, **73**).

Et même le fait qu'au Simplon, des eaux, infiltrées à la température de 3 à 5° et descendues de 700 à 1.200 mètres, ne se sont réchauffées que de 8 à 11° (au lieu de 30 à 35 que prévoyait la géothermique théorique), avec un *accroissement moyen de 1° seulement par 100 mètres, est de la plus capitale importance*. Un pareil degré géothermique (s'il demeurait constant en profondeur) permettrait aux eaux d'infiltration des neiges fondues une descente de 10.000 mètres dans l'écorce terrestre. Et même, comme la pression hydrostatique, la mise en charge, doit contribuer à ralentir considérablement la vaporisation de l'eau, il est *possible* que l'eau libre ou liquide puisse descendre beaucoup plus bas que les 18.500 mét. de Delesse, pourvu que des roches suffisamment fissurées se rencontrent au delà de cette limite.

Le sondage de Czuchow (Sibérie, 2240 mét., fin 1910) a montré, de son côté, que les circulations aquifères profondes empêchent souvent la température de l'eau de se mettre en équilibre avec celle du bassin encaissant.

Inégalités de température des sources. — C'était donc un faux principe de prétendre que la température des sources est constante et égale à la moyenne annuelle de la localité où elles émergent (1). Ceci posé, j'ai pu établir ces principes : 1° que les venues d'eau dont la température est constante ont seules la chance (et même pas toujours certaine), d'être de vraies sources; 2° que les variations (supérieures à 1° C.) de température des émergences sont d'autant plus amples, que l'influence des infiltrations extérieures s'exerce sur l'eau plus rapidement et plus directement; et 3° qu'en conséquence une émergence court d'autant plus de risques d'être polluée, contaminée, que ses oscillations thermométriques sont plus grandes et que l'écart est plus ample entre la température rafraîchie de l'hiver et celle réchauffée de l'été. — En effet, si la température d'une source paraît inférieure en hiver et supérieure en été à la moyenne température annuelle du lieu, c'est qu'elle n'est pas intégralement formée sous terre; c'est qu'elle provient, en grande partie du moins, d'un ou plusieurs ruisseaux aériens, assez longtemps exposés aux variations superficielles et trop brièvement enfouis en terre pour y équilibrer leur degré thermique. Une telle indication peut concourir à déterminer la correspondance entre une source et une rivière perdue en amont,

(1) « Les sources (non thermales, bien entendu) fournissent, en général, une bonne indication de la température moyenne du lieu où elles émergent. » (Daubrée, *Eaux souterraines actuelles*, t. I, p. 421, et de Lapparent, *Géologie*, 3e édition, p. 193, avec rectification à la 5e édit., p. 198).

L'inégalité de température des sources du calcaire avait déjà été notée par Bergmann (1780). E. Delacroix (dans le Jura, thèse de doctorat, 1847), Bonnier, Dufour et Yersin (source de l'Orbe 1854), Lorenz (golfe de Quarnero, 1859-1866), mais sans en bien préciser les causes ni en tirer les utiles conséquences.

et à sauvegarder celle-ci contre toutes causes de contamination transmissibles à la perte même (**14, 43, 57, 68, 69, 72**).

Appliquées (concurremment avec les observations géologiques) à l'étude de l'origine des émergences, ces régles empiriques rendent maintenant de grands services dans l'étude des captages d'eau (**70**).

En Bretagne et à la Sainte-Baume de l'Estérel, j'ai fait voir que, même dans les roches cristallines, comme dans le calcaire et tous les éboulis en général, les observations de température peuvent fournir, pour le captage des sources, de précieuses indications hygiéniques sur la rapidité de transmission des pluies, et par conséquent des éléments nocifs éventuellement infiltrés avec elles (**55**).

L'interprétation des inégalités et variations de température m'a donc conduit à formuler les régles suivantes, qui sont d'une application pratique bien plus courante et bien plus sûre qu'on ne le croirait, *à priori* :

1° Les émergences ne méritent le nom de *source* (les griffons thermo-minéraux sont ici hors de cause, en raison de leur modalité toute spéciale) que lorsque leurs variations de température sont à peu prés nulles ; dans ce cas, en effet, on peut *en général* préjuger l'origine *véritablement souterraine* de leur eau, géothermiquement équilibrée dans le sol, à l'abri de tout mélange artificiel et impur, ou bien sous des conditions de séjour et de contact au sein de la roche qui favorisent tout spécialement la stérilisation naturelle ;

2° On peut admettre, pour les variations, qu'il n'y a pas lieu de tenir compte de celles inférieures à 0°,5 ; cette tolérance paraît nécessaire pour les erreurs d'observations (même les mieux faites) et les imperfections instrumentales (même les plus réduites) ;

3° Dés que l'écart approche de 1° C. (évaluation résultant d'une foule d'expériences, ainsi que des recherches de Mohn, etc.), l'émergence rentre dans la catégorie des *résurgences*, c'est-à-dire des eaux sujettes aux contaminations par infiltrations lointaines ou rapprochées qui, selon la saison, le volume des eaux et d'autres facteurs, influent en froid ou en chaud sur l'émergence. Alors les causes et points de contaminations éventuelles doivent être recherchés avec le plus grand soin, soit pour interdire le captage, soit pour le mettre à l'abri des pollutions ;

4° L'observation thermométrique devrait être faite, sinon pendant une année entière, chose théoriquement désirable, mais matériellement impossible, du moins à quatre reprises : en hiver pendant la sécheresse (étiage) et après les pluies (en crues) et de même en été ; au strict minimum deux fois : après les pluies ou neiges d'hiver et aprés les sécheresses d'été. *Une seule observation est insuffisante*, si ce n'est dans certaines conditions trop longues à spécifier ici ;

5° Les mêmes régles s'appliquent, en principe, aux *nappes dites phréatiques*, parce que la contamination en est généralement trés aisée et que, plus souvent qu'on ne le pense, les puits s'alimentent à de vrais *ruisseaux de fissures* au lieu de réelles *nappes d'interstices*.

Évaporation souterraine. — C'est une croyance universelle qu'en hiver certains orifices de gouffres ou de cavernes émettent des fumées, d'où le mot fréquemment rencontré de *trous qui fument*. Le fait est exact, mais bien simple et des plus accessoires : dès que la température extérieure est voisine du point de congélation, l'air plus chaud et *plus léger* des cavités librement ouvertes au dehors, tend à s'en échapper ; et, comme il se trouve intérieurement, à plusieurs degrés de différence, sa condensation, dès sa sortie, le résout en une simple vapeur d'eau, d'autant plus visible que l'écart thermique est plus notable.

Sous terre même, et particulièrement dans des cavernes à rivières souterraines, on observe parfois de véritables *brouillards*. Ce fait, comme le précédent, est des plus secondaires et d'explication facile.

Il suffit d'une notable et passagère différence, entre la température de l'air de la grotte et celle de l'eau qui y pénètre (très froide en hiver et très chaude en été), pour qu'une temporaire condensation provoque de véritables buées. L'active évaporation d'ailleurs qui assure la formation des concrétions peut aussi ne pas demeurer étrangère, dans certaines conditions en quelque sorte hypertrophiques, au fait en question.

Pression barométrique. — Il est matériellement vérifié que les variations de la pression barométrique extérieure se transmettent aux fissures et aux mines les plus profondes.

Schmidl à Adelsberg (1852) avait établi que, sous terre, l'amplitude des variations est très légèrement plus grande qu'au dehors, mais exactement de même valeur.

En 1899, à Padirac, j'ai confirmé l'exactitude de cette conclusion (**VI, 27**).

Magnétisme. — Mes recherches ont fourni à M. le professeur Mathias (de Toulouse, actuellement au Puy-de-Dôme), l'occasion d'examiner l'influence des cassures du sol sur l'aiguille aimantée dans les gorges du Tarn. La perturbation des courants par une telle solution de continuité permettrait d'expliquer certaines différences observées dans la déclinaison entre les lèvres Est et Ouest de la gorge ; en 1903, il a entrepris, sur mon invitation, une étude spéciale dans la rivière souterraine de Padirac.

« Là se posait l'importante question de savoir si les éléments magnétiques de la surface étaient ou non identiques à ceux de l'intérieur du gouffre. Le résultat de toutes les mesures est que la composante horizontale paraît s'accroître d'un peu moins d'un millième de sa valeur, quand on passe de la surface du sol au fond du puits, tandis que l'inclinaison a sensiblement la même valeur en haut et en bas, la composante verticale s'accroissant dans la même proportion que la composante horizontale. » (Mathias.)

Une diaclase, même étendue, n'a donc qu'une faible étendue sur les anomalies magnétiques.

Il y a là un ordre de questions sur lesquelles les recherches sont loin d'être achevées.

E. — Économie rurale et travaux publics.

Nécessité du reboisement. — Restriction du pacage. — La déforestation a une répercussion lamentable sur la contamination et la diminution des sources, en augmentant, par disparition du sol végétal, le nombre des *méats* libres par où les eaux superficielles polluées peuvent aller souiller les résurgences; — au contraire, le reboisement reconstitue ce sol végétal, recompose le *feutre* qui obstrue les fissures et augmente d'autant les chances de filtrage des résurgences.

Il est *prouvé* que celles-ci sont d'autant moins dangereuses que leur bassin d'alimentation est plus boisé; et les collaborateurs de la carte géologique, dans leurs rapports officiels sur les projets de captages de sources, font le plus grand état de la situation des sources en dessous et en aval des forêts!

C'est en 1895, dans ma campagne d'Angleterre et d'Irlande, que j'ai reconnu matériellement pourquoi et comment la régénération forestière des calcaires serait efficace **(94)**. La preuve, en effet, est fournie par les *swallow-holes* d'Irlande et d'Angleterre.

Ces *swallow-holes* (*avaleurs*) ne sont pas desséchés comme la plupart des nôtres; ils fonctionnent encore, en tant que puits d'absorption pérennes et continuent de nos jours à engloutir *toute l'année* des ruisseaux formés sur les pentes supérieures de plateaux et montagnes calcaires.

Cela tient à deux causes. La première est, dans une certaine mesure, la plus grande abondance de précipitations atmosphériques, dans un climat insulaire, plus septentrional que le nôtre. La seconde est la conservation du manteau d'herbes et surtout de tourbes qui revêt les pentes fissurées; ainsi, en effet, les plus larges vides de la roche, les vrais *abîmes* sont seuls ouverts pour engouffrer le produit des pluies; les menues crevasses sont obstruées par les filtres des tourbières ou de la terre végétale.

Le meilleur exemple est, dans le comté d'York (Angleterre), la montagne d'*Ingleborough* (calcaire carbonifère, altitude 724 mètres), un véritable château d'eau, dont l'hydrographie rappelle celle du mont Ventoux en Provence. Mais ses pentes supérieures sont sillonnées d'une quantité de ruisseaux longs de 1 à 5 kilomètres, qui y entretiennent la fraîcheur, avant de s'engouffrer dans les grands *swallow-holes* et de reparaître tout autour du pied de la montagne en sources innombrables. Il n'y a point là de ces désolées étendues pétrées si tristes à contempler au causse Méjean (Lozère) et à Saint-Christol (Vaucluse).

De même sur les plateaux d'alimentation des magnifiques sources d'*Arch-Cave* et de *Marble-Arch* près d'Enniskillen (Irlande).

L'absorption y est très clairsemée, en des points sporadiques, au lieu d'être très serrée sur toute l'étendue de la surface.

La conséquence toute naturelle des faits, ainsi constatés, est bien la

preuve matérielle que la reconstitution d'un manteau de bois ou de végétaux retiendra efficacement l'humidité à la surface des sols calcaires.

Au point de vue hygiénique donc, comme à celui de la conservation des débits, il importe, envers et contre toutes contestations, et particulièrement dans les pays de montagnes, d'empêcher la déforestation industrielle, — de protéger les jeunes pousses et les gazons contre le mouton qui arrache tout, — et de reboiser les régions calcaires dans la plus large mesure possible.

Depuis 1905, tous mes rapports au ministère de l'Agriculture répètent énergiquement ces conclusions avec une multiplication toujours croissante de preuves à l'appui. Il n'y a de remède que dans l'augmentation des crédits publics attribués au reboisement et à la restauration des terrains en montagnes et dans la sévère restriction et réglementation du pacage.

En résumé, non seulement l'arbre purifie l'eau *de source*, mais il l'augmente et régularise son débit.

Diminution des Sources et Dessèchement de la Terre.

Mes explorations ont formellement démontré comment les cours d'eau externes ou internes, sous la quadruple influence de la fissuration des roches, de la pesanteur, de la corrosion et de l'érosion, tendent à abandonner la surface du sol, particulièrement dans les régions calcaires. La multiplication des vallées sèches, le creusement progressif des cavernes, le soutirage de plus en plus actif des ruissellements par les points d'absorption transforment en axiome la loi d'évolution hydrologique, que j'ai formulée, de la substitution générale (du moins en terrains fissurés) d'une circulation souterraine actuelle très restreinte à la circulation superficielle ancienne très développée ; il est désormais acquis que les cavernes ont *capturé* ou sont *en train de capturer* les rivières superficielles de leur voisinage.

Or, cette fuite des eaux est un grand péril futur pour l'alimentation, l'agriculture et l'industrie des contrées où elle sévit, parce que cette dessiccation de l'écorce terrestre calcaire est bien plus rapide qu'on ne le croirait *a priori* (VIII, IX, **34, 47, 49, 54, 68, 70, 164, 165, 166, 182, 183**).

On constate à peu près partout que le débit des sources diminue, que des lacs disparaissent, que le niveau des nappes phréatiques s'abaisse, qu'il faut refaire les captages et recreuser les puits. Ces faits, dans certaines contrées, ont pris la proportion de calamités publiques pour les captages d'eau, irrigations, forces motrices, etc. Beaucoup de savants, ne faisant état que du côté *atmosphérique* de la question, ne voient là qu'une manifestation passagère, dérivant de phénomènes météorologiques soit locaux (faiblesse des chutes de neige pendant plusieurs années), soit généraux (périodes sèches et pluvieuses de la loi si controversée de Brückner, etc.).

Mais, après tout ce que j'ai reconnu, il n'est plus permis de nier (quant à la dessiccation du sol lui-même) l'approfondissement matériel et progressif des fissures souterraines, où les eaux infiltrées continuent à creuser leurs lits

caverneux; si déchues soient-elles de leur abondance pliocène ou pléistocéne, il n'en est pas moins certain qu'elles persistent à tracer leurs *traits de scie* dans l'intérieur du sous-sol. J'ai fait observer que, dans la prison des cavernes, où abondent les siphons et les conduites forcées, la pression hydrostatique concourt singulièrement à accentuer le même effet. J'ai établi, corollairement, que la rapidité et l'importance de l'usure torrentielle externe (et *a fortiori* celles des cavernes) sont bien plus rapides qu'on ne le pensait.

On est forcé d'admettre maintenant que les rivières desséchées des régions calcaires se sont enfouies, ont disparu dans les profondeurs des cavernes qui, bien souvent, les ont fait changer de versants; dès 1894, je faisais remarquer (*Les Abîmes*, passim) comment *cette fuite progressive des eaux dans les sous-sols calcaires* et l'abandon des thalwegs extérieurs étaient caractéristiques dans les régions de cavernes; les formations miocènes et pliocènes trouvées depuis lors par moi-même ou par les autres explorateurs de cavernes (notamment M. Fournier, de Besançon) dans ces vallées sèches, sont venues en quelque sorte dater ces thalwegs et préciser, dans une certaine mesure, l'époque de leur dessèchement.

Certains gouffres ont dû s'ouvrir bien antérieurement au jurassique (V. p. 53); vers le miocène, le soutirage des grands lacs a pu commencer les cavernes actuelles; leur développement a été accompli par les captures des grands cours d'eau pliocénes, et il a été complété par les grands ruissellements du début du pléistocène.

Il en résulte de toute évidence que les plateaux calcaires, maintenant *vrais pays de la soif*, n'ont pas toujours eu la désolante sécheresse dont ils pâtissent de nos jours, — que jadis des eaux courantes y circulaient en rivières ou s'y accumulaient en lacs, — que le dessèchement a été provoqué, plus ou moins rapidement, à la suite des phénomènes dynamiques, d'ordre tectonique, qui ont ouvert aux eaux les diaclases et autres cassures du sol, — qu'il a été, en maints endroits, activé par le creusement plus rapide de certains thalwegs devenant des vallées maîtresses et soutirant, par les cavernes-sources étagées sur leurs rives, des eaux enfouies sur les plateaux latéraux, — et que les abîmes et autres points d'absorption, actuellement à sec, doivent être considérés comme les points de vidanges d'anciens fleuves, lacs et *même mers*.

Assurément, les renseignements chronologiques précis font presque totalement défaut. On constate seulement, dans les cavernes à plusieurs étages, que, d'une façon générale, les parties supérieures sont plus amples, plus vastes que les portions inférieures rétrécies (**31**); comme si, au cours des âges et de l'approfondissement de ces cavernes, la force de l'eau creusante avait été en diminuant.

Si l'on rapproche cette constatation universelle de celles qui montrent les vallées et les fleuves plus larges aux époques pliocène et pléistocène (pour nous en tenir à ces deux âges), qu'à l'époque présente, on sera nécessairement convaincu de la déchéance continue des écoulements, tant extérieurs que souterrains, au moins depuis le récent quaternaire.

Il est cependant des géologues qui repoussent cette évidence de la plus grande puissance des eaux d'antan : ils enseignent que jamais les rivières n'ont été plus fortes que nous ne les voyons, et même que ce ne sont pas elles qui ont creusé les vallées.

Tout concourt absolument, — en diverses sortes d'observations trop longues à analyser ici, — pour démontrer le mal-fondé d'une semblable opinion.

Cette évolution du creusement et ce dessèchement sont-ils mesurables à l'échelle du temps humain ? A ce propos, la controverse est des plus vives.

Les uns affirment que la lenteur du phénomène est telle, que l'observation scientifique ne saurait, même en faisant appel aux plus lointains et vagues témoignages historiques, le saisir nulle part sur le vif. D'autres, au contraire, qui se sont rangés à mon opinion très affirmative, estiment que les preuves *visibles*, *permanentes* et *enregistrables* abondent du dessèchement croissant de l'écorce terrestre (**42**, **166**, **182**, **183**).

En définitive, si l'on peut encore discuter sur la possibilité de constater dans l'atmosphère et les climats une diminution (due à bien d'autres causes, par exemple l'action des rayons ultra-violets, etc.) d'échelle historique, affectant les précipitations atmosphériques, les trois points suivants ne paraissent plus guère contestables :

1° La réduction des eaux courantes est pertinente, au moins depuis les temps géologiques pléistocènes ;

2° Leur travail d'usure externe, et souterraine encore plus, se poursuit de nos jours bien plus rapidement qu'on ne le croit en général ;

3° La rapidité de l'enfouissement graduel au sein des crevasses du sous-sol est surabondamment établie; elle suffit pour faire conclure à la dessiccation progressive de l'écorce terrestre, la question de durée demeurant, si l'on veut, réservée.

Elle suffit surtout pour démontrer la nécessité de reboiser les pays fissurés et pour supprimer, ou du moins enrayer autant que possible, le péril du progrès des absorptions : il n'y a que des intérêts et appétits privés peu dignes d'intérêt, qui puissent s'obstiner à nier la désastreuse influence des déboisements inconsidérés sur le régime de *toutes* les eaux en général (**73**, **74**).

C'est un péril si peu imaginaire qu'actuellement il provoque de graves conflits d'intérêts agricoles et industriels, par exemple dans le Doubs, entre les riverains de cette rivière (vers Pontarlier) et ceux de la résurgence de la Loue, — de même qu'en Allemagne, entre le Wurtemberg et le duché de Bade, des pertes du Danube à la résurgence de l'Aach (V. *La Nature*, n^{os} **1897** et **1909**).

A l'étude expérimentale de ces questions se rattache l'emploi de la substance colorante connue sous le nom de *fluorescéine*.

Expériences à la fluorescéine. — Pour révéler les relations, plus ou moins rapides et directes, entre les points d'absorption d'eaux polluées ou en

voie de diminution, et les résurgences, on utilise, depuis 1877, la plus puissante connue de toutes les substances colorantes, la *fluorescéine*. Un traité complet a été publié en 1904, avec ma collaboration, sur son emploi, par la Société belge de géologie (**91**).

J'ai contribué à montrer à la fois les avantages et les défauts de ce procédé (**36, 88, 89, 90, 91, 130**). Deux de ces défauts sont : le premier, la délicatesse des observations, dès qu'on se sert de l'instrument appelé *fluoroscope* (Trillat) et destiné à en amplifier la portée.

Le second, c'est qu'on ne peut jamais rien conclure des *résultats négatifs* d'une expérience à la fluorescéine ; trop de facteurs se liguent pour l'entraver. Et c'est seulement quand elle est *positive* qu'il est permis de tirer des déductions d'une pareille expérience : aussi n'est-ce en fait qu'un demi-moyen, mis à la disposition des hydrologues. Mais quand il réussit, il fournit les données les plus précieuses et souvent les plus inattendues.

Mes nombreuses expériences (et celles de MM. Fournier, Dienert, Le Couppey de la Forest, etc.), ont établi aussi qu'en général, on n'emploie pas une quantité suffisante de fluorescéine, et qu'on n'observe pas pendant un temps assez long aux résurgences, pour attendre la venue de la coloration. Il y a là deux causes, facilement évitables, de la plupart des insuccès. La plus extrême prudence doit guider les conclusions à tirer des expériences, qui doivent être multipliées, variées, et en rapport avec les conditions climatériques, géologiques et topographiques locales et souvent très différentes.

Applications aux Travaux Publics. — Dès 1893, j'ai énuméré les diverses sortes de travaux auxquels les explorations souterraines sont utilement applicables (**93**) :

Indication aux ingénieurs des cavités qui pourraient gêner la construction des ponts, canaux, routes, chemins de fer, etc.

Construction de soutènements, consolidation ou ablation de voûtes ou parois faibles pour éviter les catastrophes dues aux glissements ou affaissements.

Construction de vannes souterraines pour assurer le débit régulier des sources et éviter leur tarissement comme leur débordement (serrements).

Dérivation de réservoirs intérieurs pour les irrigations et le reboisement.

Elévation à la surface, par les puits naturels ou artificiels, des eaux souterraines rencontrées.

Transformation de certaines cavernes en trop-pleins lors des inondations.

Adaptation aux fromageries et glacières artificielles.

Les venues d'eaux froides du Simplon, — la catastrophe du Lötschberg (due à une application erronée des théories glaciaires et des trop fameuses vallées en U, v. p. 82) ont prouvé quelles prévisions utiles pourraient être fournies, par la prise en considération rationnelle de toutes les notions nouvelles ou modifiées que je viens d'exposer.

J'ai eu l'occasion de l'expliquer en détail, en 1905, dans un rapport

au Ministère des Travaux Publics, qui m'avait demandé une étude sur les conditions dans lesquelles des venues d'eau pourraient être rencontrées dans les grands tunnels projetés sous le Jura, notamment pour le tracé par la Faucille.

En 1908 et 1909, mes deux explorations de la rivière souterraine de Labouiche (Ariège) (**52**, **68**, **74**) ont prouvé que celle-ci, en deux places au moins, passe sous la ligne de chemin de fer de Foix à St-Girons, ce qui crée une situation digne d'un très sérieux examen. Le sol y est encore miné par les eaux souterraines et il paraît indispensable de mettre un terme, par des travaux spéciaux, à la continuation des érosions souterraines présentes.

La direction de l'hydraulique et des améliorations agricoles au Ministère de l'Agriculture a donc eu grandement raison d'organiser méthodiquement, depuis 1905, les recherches de ce genre dans un but d'ordre essentiellement pratique.

Elles permettront désormais de prévoir et d'éviter bien des écroulements de ponts, canaux, routes, tunnels, viaducs, voies ferrées, etc.

Fig. 43. — Katavothres du Péloponèse (V. p. 95).

Un projet d'utilisation de la source sous-marine de Port-Miou a été abandonné à la suite de mes études de 1906 et 1907, établissant que cette source n'existe pas, du moins à la place prétendue, ou qu'en tous cas elle n'est pas pérenne (**59**, **71**). J'ai indiqué (**68**, **73**, **74**) comment certaines grandes résurgences (Fontaine-l'Evêque, Var; la Bidouze et la Nive, Basses-Pyrénées, etc.), pourraient être l'objet d'essais de serrements destinés à régulariser leurs écarts.

Le problème de l'*underflow*, ou sous-écoulement des rivières, se pose aussi



Fig. 44. — Le cañon d'Olhadibre-Holçarté (Basses-Pyrénées, 1908-1909) (V. p. 96).

en France comme en Amérique (**129**). J'ai expliqué à propos des Alpines (**72**), comment on peut l'étudier pour la Durance.

Les assainissements de marécages peuvent être réalisés en bien des endroits, au grand profit de l'agriculture et de l'hygiène publique, par des désobstructions de points absorbants colmatés.

Le gouvernement autrichien a accompli, avec succès, depuis 1886, un grand nombre de ces travaux dans le Karst, en Carniole, Bosnie et Herzégovine (**II**).

Après ma visite de 1891 aux katavothres du Péloponèse (**160**), le gouvernement grec avait confié la suite des explorations et les travaux d'assainissement à M. Sidéridès, ingénieur en chef. La guerre de 1896 a malheureusement suspendu cet effort. (V. fig. 43.)

En France, le Jura présente plusieurs localités où pareilles entreprises devront être tentées.

Elles sont comprises dans le programme d'une trentaine de questions d'hydraulique souterraine que j'ai soumis, sur sa demande, à la Direction de l'hydraulique agricole. Quelques-unes ont déjà reçu une heureuse solution. Avec les crédits, encore trop restreints, dont on peut disposer, plusieurs années sont nécessaires pour les résoudre toutes ; et bien d'autres, d'incontestable utilité publique, pourraient être posées dès maintenant ou surgiront à bref délai.

Matériellement, les explorations souterraines sont pour longtemps encore un champ largement ouvert aux recherches scientifiques de toutes sortes ; pratiquement et spécialement, on n'est qu'à l'aurore des applications utilitaires (1) (alimentation, drainage, irrigation, force motrice) de l'hydrologie souterraine et torrentielle, dont la présente notice résume les découvertes et les progrès depuis 1888.

F. — Géographie locale et régionale.

En dehors des explorations et découvertes souterraines proprement dites, relatées dans *Les Abîmes* (**II**), l'*Irlande* et les *Cavernes anglaises* (**III**), *La Spéléologie* (**V**), *Padirac* (**VI**), *La Spéléologie au XXe siècle* (**VIII**), *L'Evolution souterraine* (**IX**) et les *Cavernes de Belgique* (**XIV**), j'ai fait connaître, dans la région des *Causses* (France), un grand nombre de sites et phénomènes naturels ignorés, et décrits dans *Les Cévennes et la région des Causses* (**1890, 10 éditions**) (**I**).

(1) Le Ministre de l'agriculture (M. Ruau), par une circulaire du 1er août 1908, a d'ailleurs prescrit l'établissement d'un inventaire des ressources hydrauliques du sous-sol de la France.

Par arrêté du 21 juin 1909, j'ai été chargé d'une mission ayant pour objet les études spéléologiques que soulève la confection de cet inventaire, et d'assurer en outre dans les départements la surveillance dudit inventaire.

Le Trayas et l'Estérel (IV, XI et **147**) donne le détail topographique de ce massif porphyrique si intéressant pour les géologues.

Le Massif de la Bernina (XII) est la monographie et l'historique des ascensions d'un groupe montagneux alpestre ; on y a enregistré, par l'héliogravure inaltérable, l'état de ses glaces à la fin du XIXe siècle. Ce sera plus tard un utile document comparatif.

En **1903**, la mission que m'avait confiée au Caucase le Gouvernement de S. M. le Tsar, par les soins de M. Yermoloff, alors Ministre de l'Agriculture (et correspondant de l'Académie des Sciences), avait pour objet une étude d'ensemble, destinée à concourir à l'aménagement et à la mise en valeur d'une admirable région, trop peu connue et pleine de ressources. *La côte d'azur russe* (X) est le rapport officiel de cette mission, où j'ai trouvé, dans le Caucase Occidental et en Arménie russe, bien des détails géographiques, géologiques et archéologiques ignorés (**37**, **38**, **39**, **193**). Actuellement la mise en valeur projetée est en plein développement, et tout ce splendide pays des Tcherkesses évolue à vue d'œil vers une prospérité bienfaisante.

Enfin mes missions du Ministère de l'Agriculture depuis 1905 ont révélé en pleine France les merveilles de premier ordre, quasi-impraticables, *des cañons du Verdon* (**158**) *et du Pays basque* (**73**, **74**), qui se classent parmi les paysages les plus grandioses et les plus instructifs du monde ; il est désirable qu'on les rende pratiquement accessibles (comme on l'a fait pour Padirac) à l'admiration du public et à l'étonnement des savants.

G. — DIVERSES

Zoologie. — Directement ou indirectement j'ai contribué au développement de diverses autres études souterraines (1), notamment de la zoologie. A la suite de plusieurs constatations faites sur l'altération de la vue chez des chiens rencontrés vivants au fond d'abîmes, j'avais, dès le 1er juin 1893, adressé à M. Milne-Edwards, directeur du Muséum, une note sur la nécessité d'instituer, relativement à ce sujet, des expériences de laboratoire. Le 6 juin, le regretté savant voulut bien me répondre que cette note semblait indiquer le programme de nouvelles observations : « Ne pourrait-on pas enfermer quelques animaux dans ces cavernes profondes, afin de se rendre compte de l'influence qu'aurait sur eux le milieu et surtout l'obscurité ? Il y a là matières à expériences. » Puis, je me demandais formellement, en 1894, si « les degrés dans la cécité ne proviennent pas de la différence entre les

(1) A ma connaissance, cinq récentes thèses de doctorat ont porté sur des sujets souterrains :
CORD. *De la propriété spéléologique*, Paris, 1899 ;
VIRÉ. *La Faune souterraine de France*, Paris, 1900 ;
MAHEU. *Contribution à l'étude de la flore souterraine de France*, 1906 ;
FERRASSE. *Hydrographie des bassins de la Cesse et de l'Ognon*, Paris, 1906 ;
PETIT LAURENT. *Le Haut-Jura souterrain*, Besançon, 1910.

délais écoulés depuis l'emprisonnement des espèces » (p. 574) et j'insistais de nouveau (*La Nature*, 14 janvier 1895) sur l'opportunité de « se livrer à des expériences pratiques, sur les modifications physiques que pourraient subir des animaux extérieurs enfermés au plus profond des cavernes ».

C'est ainsi qu'en 1897, M. Milne-Edwards assura l'aménagement d'un laboratoire souterrain dans une portion des Catacombes retrouvées en 1896 au Jardin des Plantes de Paris. L'installation et la direction en ont été confiées à M. Viré, qui y poursuit d'importantes expériences sur la marche de l'évolution souterraine.

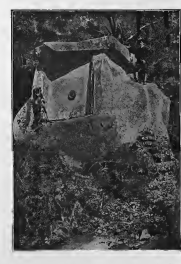


Fig. 45. — Dolmen de Pchada (Caucase-Occidental), taillé comme un nécrophage dans un bloc de grès.

Dans les *Abîmes* encore (p. 573), j'émettais l'idée de reporter l'origine de la faune souterraine « à la fin du tertiaire ». Mais alors je n'exprimais que très sommairement, à cause de sa hardiesse, cette vague idée, plutôt intuitive que raisonnée ; or, la proposition paraît s'être vérifiée très rapidement, car, depuis 1895, on a recueilli, dans plusieurs rivières souterraines de France et d'Italie, des spécimens de crustacés spéciaux, les *Sphæromiens*, pour lesquels l'examen anatomique a révélé des caractères tellement archaïques, que Viré (qui en a fait l'objet d'études spéciales) les a considérés, dès 1897, comme d'origine tertiaire.

Je ne puis que mentionner cet ordre de recherches si intéressantes, et rappeler que le *Stenasellus Virei*, considéré comme important par M. le Professeur Bouvier, a été récolté en ma présence, le 16 août 1896, lors de la première visite que fit M. Viré, et sur mon invitation, du gouffre de Padirac (alors ma propriété personnelle et où, en mars 1896, j'avais recueilli moi-même les premiers spécimens de faune aveugle).

Flore. — Quant à la flore, M. Maheu a mis au point et fructueusement complété et rectifié le peu qu'on en savait en l'étudiant à partir de 1899, à Padirac, dans les avens des Causses, du Jura, etc., etc.



FIG. 46. — Spécimen de photographie au magnésium (grandissement de 2 clichés 8×9 raccordés).
La grande stalagmite (hauteur 30 mèt.) de l'Aven-Armand (Lozère).

Préhistoire. — En préhistoire, je me borne à renvoyer aux nos (**1, 10, 77, 118, 191, 192, 193, 194**) de ma liste bibliographique, — à ma trouvaille du dolmen-sarcophage de Pchada (Caucase), taillé en plein bloc de grès (X, **193**), — et à l'indication que j'ai fournie de l'insuffisance des dépôts stalagmatiques, comme éléments de chronologie en matière de fouilles préhistoriques ou paléontologiques (**99**).

Photographie. — La nécessité de recueillir sous terre des documents authentiques m'a fait étudier, perfectionner, simplifier les procédés de photographie au magnésium dans l'obscurité (VII, **187, 188, 189**).

Si les modes d'éclairage demeurent assez compliqués, dans les vastes cavernes où je suis parvenu à obtenir des clichés de concrétions éloignées de 50 et même 60 mètres, il y a toujours avantage à les simplifier dès que les distances se trouvent plus petites d'un tiers.

J'ai notamment expliqué (**188**) aux archéologues de quelle manière il est possible de photographier, sans aucun accessoire ou instrument encombrant, les cryptes d'églises, catacombes, nécropoles et autres souterrains intéressants pour lea architectes et antiquaires.

Et j'ai constaté expérimentalement que, pour une plaque 13×18, il faut poser environ deux fois plus, partant, brûler deux fois plus de magnésium et produire deux fois plus de fumée que pour une plaque 8×9.

C'est-à-dire que les chances de réussite de toute photographie souterraine à distance sont inversement proportionnelles au format de l'appareil. Le 13 × 18 est un maximum qu'il convient de ne pas dépasser. En 8 × 9 et 9 × 12 on peut d'ailleurs obtenir de très suffisants et utilisables documents enregistreurs (fig. 46).

Enseignement. — Depuis 1886, j'ai fait connaître mes recherches et leurs résultats dans plus de 200 conférences devant les Sociétés savantes de France, Angleterre, Belgique, etc.

Et de 1899 à 1905, j'ai été autorisé à exposer (pendant six ans de suite) les progrès, les méthodes et les découvertes de la *Géographie souterraine* dans un cours libre en Sorbonne, à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris.

TABLE DES MATIÈRES

Imprimerie brevetée Fr. Simon, Rennes.